

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»**

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

*I Всероссийская конференция по электрическим машинам
в рамках Международной научно-практической конференции*

Том 2



Уфа 2022

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего образования
«Уфимский университет науки и технологий»

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

*I Всероссийская конференция по электрическим машинам
в рамках Международной научно-практической конференции*

Том 2

Научное электронное издание сетевого доступа

© УУНиТ
ISBN 978-5-7477-5643-4
ISBN 978-5-7477-5645-8 (Т. 2)

Уфа 2022

Электротехнические комплексы и системы : материалы I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции : в 2 томах [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа : УУНиТ, 2022.

Том 2. Уфимск. ун-т науки и технологий. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2022-220.pdf

Содержатся статьи, включенные в программу I Всероссийской конференции по электрическим машинам в рамках Международной научно-практической конференции «Электротехнические комплексы и системы», состоявшейся в г. Уфе 15–16 декабря 2022 г. Основные тематики сборника связаны с электротехническими комплексами и системами, электромеханикой, электроэнергетикой, электрооборудованием, электро транспортом и электрооборудованием летательных аппаратов, альтернативной энергетикой и современными информационными и цифровыми технологиями в энергетике, перспективными материалами в электротехнике.

Редколлегия:

Ф. Р. Исмагилов – зам. директора по науке Передовой инженерной школы «Моторы будущего», д-р техн. наук, профессор (ответственный редактор)

В. Е. Вавилов – директор Передовой инженерной школы «Моторы будущего», д-р техн. наук (зам. ответственного редактора)

Э. И. Зайнагутдинова – инженер отдела сопровождения Передовой инженерной школы «Моторы будущего»

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

- Adobe Acrobat – текстовый редактор;
- Microsoft Word – текстовый редактор.

Материалы публикуются в авторской редакции.

Ответственный за выпуск *Ф. Р. Исмагилов*

Компьютерная верстка *Л. А. Вяземская*

Программирование и компьютерный дизайн *О. М. Толкачёва*

Все права защищены. Книга или любая ее часть не может быть скопирована, воспроизведена в электронной или механической форме, в виде фотокопии, записи в память ЭВМ, репродукции или каким-либо иным способом, а также использована в любой информационной системе без получения разрешения от издателя. Копирование, воспроизведение и иное использование книги или ее части без согласия издателя является незаконным и влечет уголовную, административную и гражданскую ответственность.

Подписано к использованию: 30.12.2022

Объем: 24,6 М.б

ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»

450076, Уфа, ул. З. Валиди, 32.

Тел.: +7-908-35-05-007

e-mail: rik@ugatu.su

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЕНТИЛЬНО-ИНДУКТОРНЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ РАЗЛИЧНОЙ МАГНИТНОЙ ТОПОЛОГИИ НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ НЕЧЕТКИХ МНОЖЕСТВ И НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ¹

Аннотация: В статье рассматриваются модели вентильно-индукторного двигателя с различной топологией магнитной системы, созданные в среде MATLAB/Simulink с использованием методов и приемов теории искусственного интеллекта. Структура модели Simulink одинакова для различных топологий. Различия реализуются путем изменения блоков *Look-Up Table* и *MATLAB Function*. Для модели с нечеткой системой управления все топологии могут использовать один и тот же файл правил системы нечеткого вывода. Для модели с системой управления нейронной сетью каждая топология требует создания собственного файла для обучающего примера. На основе результатов верификации созданных моделей показаны возможности исследования вентильно-индукторных двигателей с различной топологией магнитной системы. Оцениваются ошибки при расчете тока, вращающего момента и угловой скорости.

Ключевые слова: компьютерное моделирование, проектирование, топология магнитной системы, вентильно-индукторный двигатель, нечеткая логика, нейронные сети.

ВВЕДЕНИЕ

Применение реактивного регулируемого привода с вентильно-индукторным двигателем (ВИД) на транспорте имеет очевидные преимущества [1]-[7], но ограничено несовершенством процедуры его проектирования. Дополнительные возможности для эффективного проектирования ВИД открывает математическое блочное визуально-ориентированное моделирование в матричной системе MATLAB с пакетами расширения Simulink и SimPowerSystems [8]-[12].

В настоящее время широко используются модели и методы, основанные на теории нечетких множеств, гибридных и нейронных сетей, в том числе и для управления электроприводами [13]-[19]. Способы практической реализации нечетких и нейронных систем возможны в пакетах прикладных программ MATLAB.

В настоящей работе представлены созданные в среде Matlab/Simulink модели регулирования вентильно-индукторного привода с помощью методов и приемов теории искусственного интеллекта при различной магнитной

¹Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 20-08-00386.

топологии магнитной системы двигателя. Выполнена верификация созданных моделей в различных режимах широкого диапазона регулирования частоты вращения двигателя и установлено, какие выбранные методы и характеристики контроллеров искусственного интеллекта позволяют успешно моделировать ВИД.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Объектом исследования являются вентильно-индукторные двигатели с различной топологией магнитной системы:

- Электродвигатель ВИД-1.5-1130 (лабораторная модель) с топологией 6/4 ($N_s=6$ полюсов статора и $N_r=4$ полюсов ротора).
- Тяговый электродвигатель троллейбуса ВИД-180-1500 с топологией 12/8 ($N_s=12$ полюсов статора и $N_r=8$ полюсов ротора).
- Тяговый электродвигатель шахтного электровоза ВИД-14-615 с топологией 8/6 ($N_s=8$ полюсов статора и $N_r=6$ полюсов ротора).

Разработка ВИД выполнена на принципах блочно-модульного проектирования, применение которых обеспечивает минимум производственных и финансовых затрат [12]. Блочно-модульное проектирование новых двигателей означает, что выбирается базовый прототип освоенного промышленностью двигателя и сохраняются все необходимые узлы и детали (корпус, вал, подшипники, щиты и т.д.) за исключением вновь разработанных катушек статора, пакетов статора и ротора, а также небольшой доработки вала. Таким образом, при блочно-модульном проектировании ограничениями при разработке являются внешний диаметр пакета статора и внутренний диаметр пакета ротора, которые необходимо сохранить при проектировании листов железа статора и ротора. Основные данные исследованных ВИД представлены в таблице 1.

Основные данные и параметры вид

Parameters	ВИД-1,5-1130	ВИД-180-1500	ВИД-14-615
Число фаз обмотки статора	3	3	4
Число полюсов статора	6	12	8
Число зубцов ротора	4	8	6
Внешний диаметр статора, мм	191	520	396
Диаметр ротора, мм	98	360	261
Длина пакета статора, мм	100	420	215
Воздушный зазор, мм	1,0	0,6	1,0
Число витков катушки	156	10	23,5
Индуктивность фазы, мГн	29,0	16,5	1,7
Вращающий момент при $I=I_n$, Нм	5,5	1033	86,5
Вращающий момент при $I=2I_n$, Нм	16,3	2113	200,0

Для включения в процедуру проектирования ВИД разработаны три вида моделей в матричной системе MATLAB с пакетами расширения Simulink и SimPowerSystems для топологии магнитной системы 6/4, 12/8 and 8/6. Разработанная авторами в среде MATLAB/Simulink структура модели регулирования частоты вращения ограничением тока представлена на рис. 1.

Частота вращения двигателя ω определяется после решения уравнения движения. Заданными параметрами являются: напряжение U , ограничение тока I_{ref} , момент нагрузки T_{load} , момент инерции J , углы включения θ_{on} и отключения фаз θ_{off} . Структурная схема каждой фазы этой модели сохранена при создании двух новых моделей, разработанных в среде MATLAB/Simulink для регулирования ВИД с помощью методов и приемов теории искусственного интеллекта.

В блоке *Look-Up Table* the данные фазного тока записаны в виде двумерной таблицы в зависимости от потокосцепления и угла рассогласования $i=f(\psi, \theta)$. Данные получены путем численного решения задачи электромагнитного поля в виде зависимости $\psi=f(i, \theta)$ потокосцепления от углов рассогласования и были преобразованы средствами MATLAB.

В блоке *Look-Up Table 1* записаны данные момента в зависимости от фазного тока и угла рассогласования. Задача решена также созданием *m*-файла

MATLAB, в котором по зависимости $\psi=f(i,\theta)$ найдена коэнергия и определен ее градиент.

Блок *MATLAB Function 2* с помощью функции *rem* (остаток после деления) преобразует непрерывную функцию угла поворота ротора в функцию угла поворота в пределах от 0 до $\pi/2$ для топологии магнитной системы 6/4, в пределах от 0 до $\pi/4$ для топологии магнитной системы 12/8, в пределах от 0 до $\pi/3$ для топологии магнитной системы 8/6.

Блок *MATLAB Function 7* с помощью созданного *m*-файла для каждой фазы преобразует значения угла поворота из диапазона, полученного функцией *rem* к диапазону, для которого записаны двумерные таблицы блоков *Look-Up Table* и *Look-Up Table 1*, а именно из диапазона $0-\pi/4$ к диапазону $0-\pi/8$ для топологии 6/4, из диапазона $0-\pi/4$ к диапазону $0-\pi/8$ для топологии 12/8, из диапазона $0-\pi/3$ к диапазону $0-\pi/6$ для топологии 8/6.

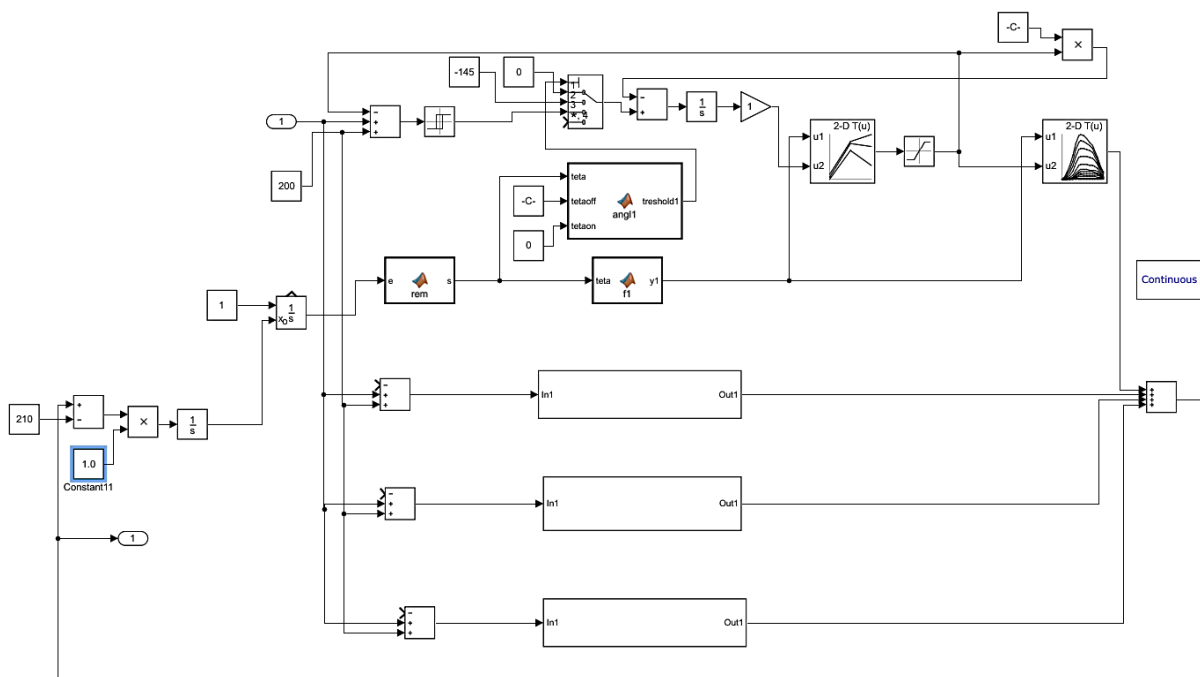


Рис. 1. Имитационная структурная схема ВИД для регулирования частоты вращения ограничением тока

Блок *MATLAB Function* с помощью *m*-файла для каждой фазы обеспечивает переключение сигналов в многопортовом переключателе в соответствии с выражением:

$$\begin{aligned}
u_j &= U_{dc}, \theta_{on} \leq \theta \leq \theta_{off}, \\
u_j &= -U_{dc}, \theta_{off} \leq \theta \leq \theta_{ent}, \\
u_j &= 0, \theta \geq \theta_{ent},
\end{aligned}
\tag{1}$$

где θ – угол рассогласования положения ротора и статора, u_j – напряжение фазы в зависимости от угла θ .

Для возможности наблюдения за ходом процессов при моделировании использовалось измерительное устройство – осциллограф *Scope*. С помощью блоков математической обработки сигнала определены действующие значения тока фазы и среднее значение момента двигателя, которые выведены на экран виртуального дисплея. Для последующего анализа данные фазного тока, потокосцепления и вращающего момента сохранены в рабочем пространстве с помощью блоков *Simout*.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На основе модели вентильно-индукторного преобразователя энергии для исследования регулирования частоты вращения двигателя ограничением тока (рис. 1) разработаны модели регулирования ВИД с помощью методов и приемов теории искусственного интеллекта при различной магнитной топологии магнитной системы двигателя, а именно модель с нечеткой системой управления и модель с системой управления нейросетью.

Модель с нечеткой системой управления разработана в интерактивном режиме в пакете *Fuzzy Logic Toolbox*. В имитационную структурную схему управления скоростью с ограничением тока (рис. 1) был добавлен фрагмент рис. 2, а для создания блок-схемы управления скоростью с нечеткой логикой. Выбраны методы и характеристики, внесение которых в блоки *Fuzzy logic controller* и *Model References Control* обеспечило успешный результат моделирования.

Выбрана система нечеткого вывода типа Sugeno с двумя входными переменными – угловой частотой вращения ω и ее отклонением от заданной частоты вращения $\Delta\omega = \omega - \omega_{ref}$. Каждая переменная характеризуется 5 функциями принадлежности, тип которых можно выбрать из встроенных в

редактор функций. Для обеих переменных выбраны треугольные функции типа *trimf* (S2, S1, CE, B1, B2), которые представлены на рис. 3. Для функций принадлежности записаны 25 правил системы нечеткого вывода в виде: «If (x_1 is S2) and (x_2 is S2) then (y is S2)». Принятые правила представлены в табл. 2.

Таблица 2

Правила системы нечеткого вывода

$\omega / \Delta\omega$	S2	S1	CE	B1	B2
S2	S2	S2	S2	S1	CE
S1	S2	S1	S1	CE	B1
CE	S2	S1	CE	B1	B2
B1	S1	CE	B1	B1	B2
B2	CE	B1	B2	B2	B2

Для выполнения логической конъюнкции в условиях нечетких правил выбран метод алгебраического произведения (*prod*), а для выполнения логической дизъюнкции метод алгебраической суммы (*probor*).

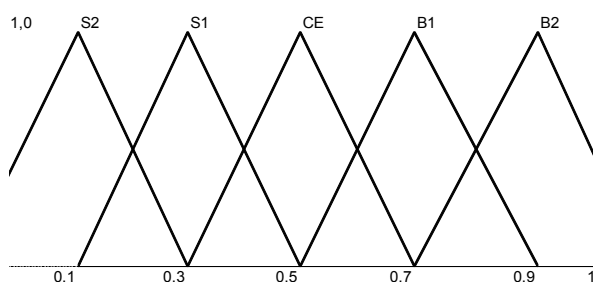


Рис. 2. Функции принадлежности для переменных ω и $\Delta\omega$

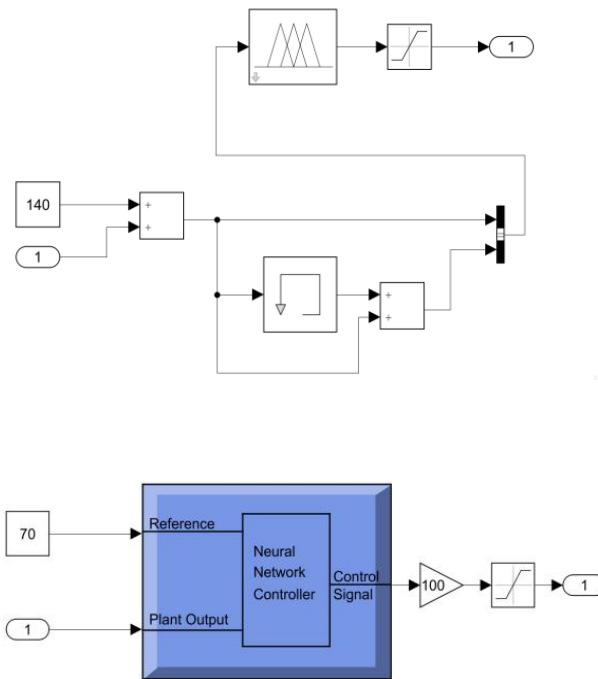


Рис. 3. Фрагменты для создания имитационной структурной схемы ВИД для управления скоростью с нечеткой логикой (а) и с нейронной сетью (б)

Для выполнения логического заключения в каждом из нечетких правил выбран метод минимального значения (\min), а для агрегирования значений – метод максимального значения (\max). Для выполнения дефаззификации выходных переменных в системе нечеткого вывода типа Sugeno принят метод взвешенного среднего ($wtaver$). По выбранным условиям создан файл *SRModfuzzylogic*, который записан в блок *Fuzzy logic controller with Ruleviewer* Simulink модели любой топологии ВИД.

Сравнение результатов моделирования, полученных на эталонной модели и модели с нечеткой системой управления выполнено по основным параметрам исследуемого режима – действующему значению тока фазы I_{rms} , угловой частоте вращения ω , среднему значению вращающего электромагнитного момента M_{mean} , коэффициенту пульсации момента KpT . Результаты сравнения представлены в таблице III (модель рис. 1 – ω , модель рис. 2, а – ωFL).

Практически во всех режимах на модели на основе нечеткой логики для всех топологий получены адекватные эталону результаты, лишь в режимах максимальной скорости имеет место погрешность по угловой частоте вращения

8,1% (топология 6/4), а для топологии 8/6 отмечены погрешность по току, которая практически отсутствует в двух других топологиях.

Модель с системой управления нейросетью разработана в пакете Neural Network Toolbox. В имитационную структурную схему управления скоростью с ограничением тока (рис. 1) добавлен фрагмент рис. 2, б для создания блок-схемы управления скоростью с помощью нейронной сети. Точки соединения фрагментов показаны на рис. 1 и рис. 2, б. Выбраны методы и характеристики, внесение которых в блоки *Model References Control* обеспечило успешный результат моделирования.

В качестве управляющей системы выбран регулятор на основе эталонной модели – Model References Control.

В качестве обучающего примера для каждой топологии созданы файлы *srm_nNN_64*, *srm_nNN_128*, *srm_nNN_86*, в которых записана зависимость угловой частоты вращения от времени $\omega=f(t)$, полученная при расчете по эталонным моделям *base64.mat*, *base128.mat*, *base86.mat*, и число переменных (35070, 15750, 102600), минимальное (0) и максимальное (ω_{ref}) значения, максимальное (0,001) и минимальное (0,0001) значения интервалов.

В окне Model References Controller также представлены выбранные данные: количество скрытых слоев – 10, задержанные входы эталонной модели – 2, задержанные выходы контроллера – 1, задержанные выходы объекта – 2. Для идентификации модели объекта (Plant indetification) установлено: количество скрытых слоев – 10, задержанные входы модели объекта – 2, задержанные выходы модели объекта – 2. При обучении сети по указанному числу итераций и тренировки контроллера получаем данные, после окончательного принятия которых Simulink файлы *srm_nNN_64*, *srm_nNN_128*, *srm_nNN_86* готовы к моделированию.

Сравнение результатов моделирования, полученных на эталонной модели и модели с системой управления нейросетью, выполнено по основным параметрам исследуемого режима и представлено в таблице IV (модель рис. 1 – ω , модель рис. 2, б – ω_{NN}).

Практически во всех режимах на модели с системой управления нейросетью для всех топологий получены адекватные эталону результаты. Погрешность по угловой частоте вращения максимальна (1,6%) для топологии 8/6. Погрешность по току имеется и в топологиях 6/4 (4,4%) и 12,8 (3,5%), которая отсутствовала при моделировании с системой управления нечеткой логикой.

Таблица 3

Сравнение результатов моделирования для системы управления нечеткой логикой

Режимы работы			Схема	Результаты моделирования			
I_{ref}, A	M, Nm	$\theta, рад$		I_{rms}, A	$\omega, рад/сек$	M, Nm	$KpM, \%$
ВИД-3,5-1130 (топология 6/4)							
30	15	$\pi/5$	ω	18,27	178,50	15,24	30,10
			ωFL	18,01	182,30	14,64	30,30
20	10	$\pi/5$	ω	15,84	234,90	9,55	20,70
			ωFL	16,24	254,00	9,76	29,30
20	10	$7\pi/30$	ω	18,19	267,60	10,53	28,80
			ωFL	18,19	285,40	10,47	30,40
ВИД-180-1500 (топология 12/8)							
360	1200	$\pi/10$	ω	185,00	127,50	1202,40	55,00
			ωFL	185,00	127,30	1202,40	53,60
300	800	$\pi/10$	ω	177,80	140,00	828,80	61,10
			ωFL	177,80	139,90	828,80	61,00
SRM-14-615 (топология 8/6)							
200	216	$\pi/8$	ω	71,10	68,60	215,60	25,60
			ωFL	81,70	68,60	213,70	24,00
200	33	$\pi/8$	ω	31,10	116,00	42,90	46,50
			ωFL	34,50	112,40	44,80	42,40

Сравнение результатов моделирования для системы управления нейросетью

Режимы работы			Схема	Результаты моделирования			
I_{ref}, A	$M, Нм$	$\theta, рад$		I_{rms}, A	$\omega, рад/сек$	$M, Нм$	$KpM, \%$
ВИД-3,5-1130 (топология 6/4)							
30	15	$\pi/5$	ω	18,27	178,50	15,24	30,10
			ωNN	18,27	178,50	15,22	30,30
20	10	$\pi/5$	ω	15,84	234,90	9,55	20,70
			ωNN	16,00	232,70	10,30	32,30
20	10	$7\pi/30$	ω	18,19	267,60	10,53	28,80
			ωNN	17,38	267,70	10,26	26,90
ВИД-180-1500(топология 12/8)							
360	1200	$\pi/10$	ω	185,00	127,50	1202,40	55,00
			ωNN	185,00	127,50	1202,00	54,90
300	800	$\pi/10$	ω	177,80	140,00	828,80	61,10
			ωNN	171,50	139,90	828,80	53,60
ВИД-14-615 (топология 8/6)							
200	216	$\pi/8$	ω	71,10	68,60	215,60	25,60
			ωNN	80,40	68,40	221,40	23,40
200	33	$\pi/8$	ω	31,10	116,00	32,90	46,50
			ωNN	37,50	114,10	32,60	48,20

ВЫВОДЫ

1. Для исследования режимов работы вентильно-индукторных двигателей с помощью методов и приемов искусственного интеллекта в среде MATLAB/Simulink разработаны две модели применимые для различных топологий магнитной системы: модель с нечеткой системой управления в пакете Fuzzy Logic Toolbox и модель с системой управления нейросетью в пакете Neural Network Toolbox.

2. В качестве исходных данных для верификации разработанных математических моделей приняты действующее значение тока, частота вращения двигателя и значение электромагнитного момента.

3. По результатам верификации созданных моделей в различных режимах в широком диапазоне регулирования частоты вращения установлено, какие выбранные методы и характеристики контроллеров искусственного интеллекта позволяют успешно моделировать вентильно-индукторный привод.

4. Для модели с нечеткой системой управления все топологии могут использовать один и тот же файл правил системы нечеткого вывода. Максимальная погрешность моделирования составила по току 14,0% (топология 8/6), по угловой частоте вращения 8,1% (топология 6/4), по вращающему моменту 4,4% (топология 8/6).

5. Для модели с системой управления нейросетью каждая топология требует создания собственного файла для обучающего примера. Максимальная погрешность моделирования составила по току 20,0% (топология 8/6), по угловой частоте вращения 1,6% (топология 8/6) и по вращающему моменту 7,8% (топология 6/4).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. К. Птах, “Вентильно-индукторный реактивный электропривод средней и большой мощности: зарубежный и отечественный опыт,” *Электротехника: сетевой электронный научный журнал*, 2015, т. 2, №3, с. 23–33.
2. F. Bokose, L. Vandeveld, and J. A. A. Melkebeek, “Structural design-optimization of switched reluctance motors based on long-range deformation forces using finite element method coupled with a genetic algorithm,” presented at the 16th Int. Conf. Electr. Mach., Cracow, Poland, 2004.
3. R. Rocca, F. G. Capponi, G. De Donato, M. Rashed, S. Papadopoulos, and M. Galea, “Analytical approach for the identification of an optimal design space for switched reluctance machines,” presented at the 23rd Int. Conf. Electr. Mach., Alexandroupoli, Greece, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507017>.
4. K. M. Rahman, B. Fahimi, G. Suresh, A. V. Rajarathnam, and M. Ehsani, “Advantages of switched reluctance motor applications to EV and HEV: design and control issues,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 36, pp. 111–121, 2000. <https://doi.org/10.1109/28.821805>.
5. K. Kiyota and A. Chiba, “Design of switched reluctance motor competitive to 60-kW IPMSM in third-generation hybrid electric vehicle,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, pp. 2303–2309, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2227091>.
6. M. Takeno, A. Chiba, N. Hoshi, S. Ogasawara, M. Takemoto, and M. A. Rahman, “Test results and torque improvement of the 50-kW switched reluctance motor designed for hybrid electric vehicles,” *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 48, pp. 1327–1334, 2012. <https://doi.org/10.1109/TIA.2012.2199952>.
7. M. V. Terzic, B. Bilgin, and A. Emadi, “Switched Reluctance Motor Design for a Forklift Traction Application,” presented at the 23rd Int. Conf. Electr. Mach., Alexandroupoli, Greece, 2018. <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2018.8507083>.
8. P. Andrada, B. Blanque, M. Capo, G. Gross, and D. Montesinos, “Switched Reluctance Motor Controller for Light Electric Vehicles,” presented at the 20th Eur. Conf. Power Electron. Appl., Riga, Latvia, 2018.
9. A. Matveev, V. Kuzmichev, R. Nilssen, T. Undeland, and O. S. Bragstads, “Two Approaches For Modeling Of Switched Reluctance Drives,” presented at the 10th Eur. Conf. Power Electron. Appl., Toulouse, France, 2003.
10. F. Soares and P. J. C. Branco, “Simulation of a 6/4 switched reluctance motor based on Matlab/Simulink environment,” *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 37, pp. 989–1009, 2001. <https://doi.org/10.1109/7.953252>.

11. P. Chancharoensook and M. F. Rahman, "Dynamic modeling of a four-phase 8/6 switched reluctance motor using current and torque Look-up tables," presented at the 28th Industrial Electron. Conf., Sevilla, Spain, 2002. <https://doi.org/10.1109/IECON.2002.1187557>.
12. V. N. Antipov, A. D. Grozov, and A. V. Ivanova, "Switched reluctance motor for a trolleybus traction application: Design and modeling," presented at the 24th Int. Conf. Electr. Mach., Gothenburg, Sweden (Virtual conference), 2020. <https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270914>.
13. A. Tuysuz and C. Budde, "On the Use of Switched Reluctance Machines in Highly Dynamic Drive Applications," presented at the 24th Int. Conf. Electr. Mach., Gothenburg, Sweden (Virtual conference), 2020. <https://doi.org/10.1109/ICEM49940.2020.9270857>.
14. K. Tanaka and H. O. Wang, *Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach*, New York: Wiley, 2001. <https://doi.org/10.1002/0471224596>.
15. V. S. Wadnerkar, M. M. Bhaskar, T. R. Das, and A. D. RajKumar, "A New Fuzzy Logic based Modeling and Simulation of a Switched Reluctance Motor," *J. of Electrical Engineering & Technology*, vol. 5(2), pp. 276–281, 2010. <https://doi.org/10.5370/JEET.2010.5.2.276>.
16. E. Karakas and S. Vardarbasi, "Speed control of SR motor by self-tuning fuzzy PI controller with artificial neural network," *Sadhana – Acad. Proc. Eng. Sci.*, vol 32, pp. 587–596, 2007. <https://doi.org/10.1007/s12046-007-0044-4>.
17. V. Pushparajesh, M. Balamurugan, and N. Ramaiah, "Artificial neural network based direct torque control of four phase switched reluctance motor," *SSRN Electronic J.*, pp. 1–8, 2019. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3371369>.
18. C. Li, G. Wang, Y. Li, and A. Xu, "Robust adaptive neural network control for switched reluctance motor drives," *Automatika*, vol. 59, pp. 24–34, 2018. <https://doi.org/10.1080/00051144.2018.1486797>.
19. S. Mir, M. S. Islam, T. Sebastian, and I. Husain, "Fault-tolerant switched reluctance motor drive using adaptive fuzzy logic controller," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 19, pp. 289–295, 2004. <https://doi.org/10.1109/TPEL.2003.823244>.

Юсеф А., Лашкевич М. М., Столяров Е. О., Жарков А. А., Кулик Е. С.,
Анучин А. С.
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

МЕТОД РЕГУЛИРОВАНИЯ ТОКА С ПРИБЛИЗИТЕЛЬНО ПОСТОЯННЫМИ ПОТЕРЯМИ ДЛЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С РАСЩЕПЛЕННЫМИ ОБМОТКАМИ¹

Аннотация: Асинхронные двигатели являются преобладающим типом электрической машины в тяжелых тяговых применениях, таких как карьерные самосвалы и локомотивы. Однако они имеют ограничения в работе на низких и нулевых скоростях с большими низкочастотными токами, вызывающими термоциклирование тягового инвертора. Проблема термоциклирования тягового инвертора может быть решена путем использования конфигурации двигателя с расщепленными обмотками, питаемого от трехфазного H-мостового инвертора на базе силовых ключей SiC-MOSFET. В данной статье предлагается метод регулирования тока с приблизительно постоянными потерями и реализация векторной системы управления тяговым асинхронным двигателем для предложенного способа регулирования токов. Показано, что предложенный метод регулирования тока позволяет уменьшить изменение потерь в полупроводниковых устройствах на электрическом обороте для малых и нулевых скоростей со 100 % до примерно 40 % от среднего значения. Это снижает амплитуду термического цикла и значительно увеличивает срок службы тягового преобразователя в подобных тяжелых условиях.

Ключевые слова: активная термостабилизация, термоциклирование, асинхронный двигатель, тяговый электропривод, расщепленные обмотки, SiC MOSFET.

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных типов электрических машин, используемых в тяговом приводе, является асинхронный двигатель. Он используется в локомотивах 1, карьерных самосвалах 2, пропульсивных системах кораблей и т.д. Однако существует режим работы, чрезвычайно тяжелый для силовой электроники и особенно для тяговых преобразователей с асинхронными двигателями - работа на низких или нулевых скоростях. Например, водителям карьерного самосвала запрещено использование электрической тормозной системы на стоянках, а применение механической тормозной системы обязательно.

Корень проблемы заключается в токах низкой частоты, протекающих в асинхронном двигателе на близкой к нулю скорости при создании двигателем некоторого момента. Когда самосвал останавливается на уклоне и использует

¹Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект №21-19-00696).

электрическую тормозную систему для поддержания своего положения, как показано на рис. 1а, тяговый привод должен создавать некоторый момент, чтобы самосвал не скатываться. Принцип работы асинхронного двигателя основан на разнице между частотой вращения ротора и частотой тока статора, называемой скольжением и примерно пропорциональной создаваемому моменту (см. рис. 1б). Это скольжение невелико, и производители двигателей стараются конструировать свои машины с настолько малым скольжением, насколько это возможно, потому что оно определяет КПД двигателя. Чем меньше скольжение, тем меньше потери в роторе и ниже частота тока статора в режиме остановки на уклоне. А чем ниже частота тока, тем больше перепад температуры полупроводников тягового инвертора на одном периоде тока, что определяет его термоциклирование 3, 4.

Во время стоянки на уклоне двигатель создает момент при малой частоте тока статора, как показано на рис. 1в. Этот ток нагревает силовые полупроводники в тяговом инверторе, но поскольку тепловая постоянная времени перехода мала, то это приводит к большой девиации температуры. Такие условия работы приводят к выходу из строя тягового инвертора через несколько часов из-за термоциклического старения. Схожая проблема возникает кратковременно, когда тяжелое транспортное средство только начинает свое движение.

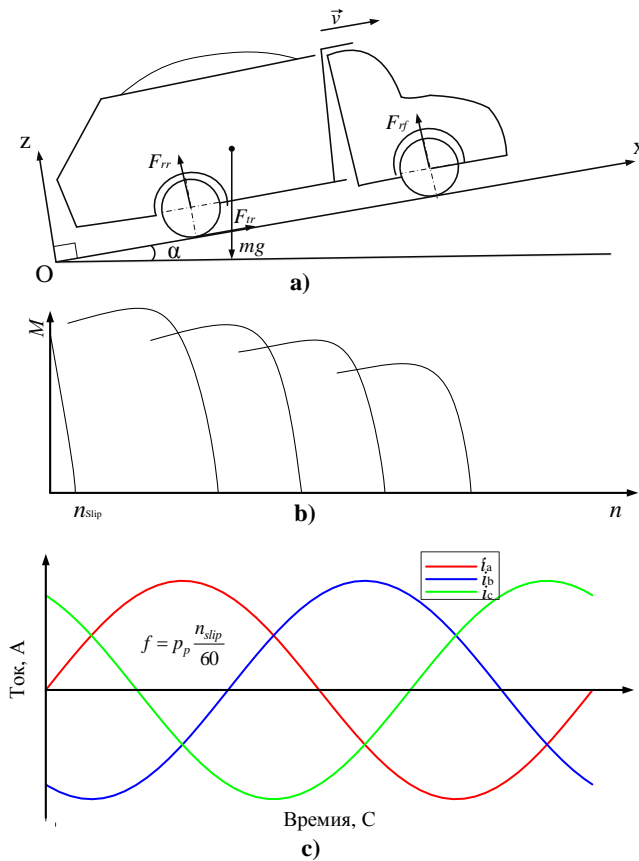


Рис. 1. Работа тягового асинхронного привода карьерного самосвала стоянке на уклоне

Чтобы решить эту проблему, можно использовать активную термостабилизацию. Например, в 5 было предложено регулировать сопротивление затвора в цепях управления IGBT в зависимости от протекающего тока. Однако это решение слишком сложное и дорогое. В 6 предлагается варьировать частоту коммутации, делая ее быстрее при малых токах и медленнее при больших. Это может быть применено к синусоидальной форме тока, но есть два ограничения. Частота широтно-импульсной модуляции (ШИМ) должна быть кратна некоторому базовому значению, чтобы исключить трансформаторное взаимодействие с другими фазами. Кроме того, максимальная частота ШИМ ограничена конструкцией IGBT-драйвера, и стабилизировать температуру при почти нулевом токе невозможно.

В 7 предложено пространственно-векторное регулирование тока, которое не только увеличивает максимальный выходной момент машины с расщепленными обмотками, но и снижает максимальную температуру

кристалла полупроводника и разброс температур. В [8] был предложен метод регулирования тока с приблизительно постоянными потерями для синхронных двигателей с возбуждением от постоянных магнитов. Он применим для двигателей с расщепленными обмотками, питаемых от трехфазного H-мостового инвертора на базе силовых модулей SiC MOSFET. Однако этот метод не позволяет точно контролировать ток по продольной оси и поэтому он не подходит для асинхронных двигателей.

В данной статье предлагается метод управления асинхронным двигателем, который учитывает процесс намагничивания машины и корректирует задания токов для обеспечения стабильности момента на валу. Девиация потерь в ключах сократилось со 100 % до 40 % (от максимума до минимума) от среднего значения. Это помогает увеличить срок службы силовых модулей примерно в 20 раз по сравнению с обычным синусоидальным регулированием тока.

РЕГУЛИРОВАНИЕ ТОКА С ПРИБЛИЗИТЕЛЬНО ПОСТОЯННЫМИ ПОТЕРЯМИ ДЛЯ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Двигатель с расщепленными обмотками имеет независимые фазы, и ток в каждой фазе можно регулировать независимо. Это означает, что в отличие от машины, обмотки которой соединены в звезду, сумма фазных токов не обязательно будет равна нулю. Сумма токов называется током нулевой последовательности, и обычно инженеры пытаются уменьшить или исключить его с помощью аппаратных или программных решений. На рис. 2 показана система управления двигателем с расщепленными обмотками, питаемого от трехфазного H-мостового инвертора с одним источником питания. Ток нулевой последовательности можно использовать для сглаживания пиков фазных токов в пространственно-векторном регулировании тока [7]. Показано, что такой метод уменьшает девиацию температуры кристалла ключей инвертора при работе на малых скоростях. Но можно пойти дальше и сделать потери в ключах

практически постоянными независимо от текущего углового положения потока ротора.

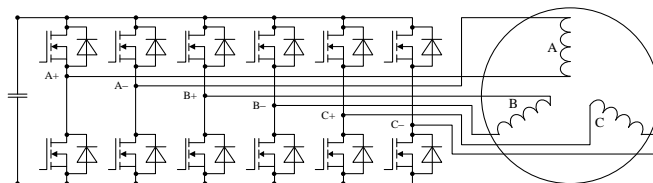


Рис. 2. Трехфазный H-мостовой инвертор для питания двигателей с расщепленными обмотками

А. Расчет заданий фазных токов

Асинхронный двигатель обычно управляется с помощью векторного управления с ориентацией по потокосцеплению ротора. Два регулятора тока отвечают за токи по осям d и q . Ось d ориентирована вдоль вектора потокосцепления ротора и ее ток является так называемым намагничивающим током. Ток по оси q определяет момент двигателя:

$$T = \frac{L_m}{L_r} \psi_{rd} i_{sq}, \quad (1)$$

где L_m — взаимная индуктивность двигателя, L_r — полная индуктивность обмотки ротора, ψ_{rd} — составляющая потокосцепления ротора по оси d , которая по определению равна его величине, i_{sd} — ток статора по оси q .

Зная эти токи и угловое положение потока ротора θ_{Ψ_r} , можно вычислить токи в стационарной системе координат $\alpha\beta$, а затем преобразовать их в компоненты a, b и c токов статора:

$$\left. \begin{aligned} i_{s\alpha ref} &= i_{sd ref} \cos \theta_{\Psi_r} - i_{sq ref} \sin \theta_{\Psi_r}; \\ i_{s\beta ref} &= i_{sd ref} \sin \theta_{\Psi_r} + i_{sq ref} \cos \theta_{\Psi_r}, \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

$$\left. \begin{aligned} i_{sa ref} &= i_{s\alpha ref} + i_{s\gamma ref}; \\ i_{sb ref} &= -\frac{1}{2} i_{s\alpha ref} + \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta ref} + i_{s\gamma ref}; \\ i_{sc ref} &= -\frac{1}{2} i_{s\alpha ref} - \frac{\sqrt{3}}{2} i_{s\beta ref} + i_{s\gamma ref}, \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

где $i_{s\gamma}$ — ток нулевой последовательности, который в данный момент равен нулю.

Полученные токи имеют разные значения. Ток с наименьшим абсолютным значением оказывает наименьшее влияние на выходной момент, и этот ток можно отрегулировать до значения, равного среднему значению между абсолютными значениями двух других фазных токов:

$$\left. \begin{aligned} i_{min} &= \min(i_{sa\ ref}, i_{sb\ ref}, i_{sc\ ref}); \\ i_{max} &= \max(i_{sa\ ref}, i_{sb\ ref}, i_{sc\ ref}); \\ i_{av} &= \frac{1}{2}(|i_{max}| + |i_{min}|), \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

$$\left. \begin{aligned} &\text{if } (i_{sa\ ref} \neq i_{max}) \times (i_{sa\ ref} \neq i_{min}) \\ &\quad \text{then } i'_{sa\ ref} = \text{sign}(i_{sa\ ref}) \cdot i_{av} \\ &\quad \text{else } i'_{sa\ ref} = i_{sa\ ref}; \\ &\text{if } (i_{sb\ ref} \neq i_{max}) \times (i_{sb\ ref} \neq i_{min}) \\ &\quad \text{then } i'_{sb\ ref} = \text{sign}(i_{sb\ ref}) \cdot i_{av} \\ &\quad \text{else } i'_{sb\ ref} = i_{sb\ ref}; \\ &\text{if } (i_{sc\ ref} \neq i_{max}) \times (i_{sc\ ref} \neq i_{min}) \\ &\quad \text{then } i'_{sc\ ref} = \text{sign}(i_{sc\ ref}) \cdot i_{av} \\ &\quad \text{else } i'_{sc\ ref} = i_{sc\ ref}. \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Модифицированное задание тока имеет тот же знак, но его абсолютное значение изменилось. Данное изменение влияет на создаваемый момент, а, следовательно, задания двух других токов должны быть также скорректированы. Новые задания токов по осям d и q можно вычислить с помощью обратных преобразований:

$$\left. \begin{aligned} i'_{sa\ ref} &= \frac{2}{3}i'_{sa\ ref} - \frac{1}{3}i'_{sb\ ref} - \frac{1}{3}i'_{sc\ ref}; \\ i'_{sb\ ref} &= \frac{1}{\sqrt{3}}i'_{sb\ ref} - \frac{1}{\sqrt{3}}i'_{sc\ ref}, \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} i'_{sd\ ref} &= i'_{sa\ ref} \cos \theta_{\Psi_r} + i'_{sb\ ref} \sin \theta_{\Psi_r}; \\ i'_{sq\ ref} &= -i'_{sa\ ref} \sin \theta_{\Psi_r} + i'_{sb\ ref} \cos \theta_{\Psi_r}. \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

Эти задания дополнительно должны быть скорректированы в соответствии с уравнением момента (1). В нем две переменные: одна — потокосцепление ротора, другая — ток по оси q . Первую составляющую нельзя изменить мгновенно, отрегулировав заданный ток, так как темп ее изменения

определяется постоянной времени ротора. Следовательно, необходимо отрегулировать ток по оси q в соответствии с:

$$i_{sq\ ref}'' = \frac{L_r T_{ref}}{L_m \hat{\Psi}_r}, \quad (8)$$

где $\hat{\Psi}_r$ — оценка величины потокосцепления ротора.

После этого уравнения (2) и (3) должны быть пересчитаны с новыми заданиями токов. Полученные задания фазных токов следует скорректировать некоторым током нулевой последовательности, который разместит максимальное и минимальное задания токов на равном расстоянии от нуля:

$$\left. \begin{aligned} i_{min} &= \min(i_{a\ ref}'', i_{b\ ref}'', i_{c\ ref}''); \\ i_{max} &= \max(i_{a\ ref}'', i_{b\ ref}'', i_{c\ ref}''); \\ i_{\gamma\ ref}'' &= -\frac{1}{2}(i_{max} + i_{min}). \end{aligned} \right\} \quad (9)$$

Рассчитанный ток нулевой последовательности должен регулироваться регулятором тока нулевой последовательности, который работает параллельно с регуляторами тока осей d и q .

В. Структура системы управления

Предложенный способ регулирования тока применим только для малых и нулевых скоростей, когда ЭДС двигателя невелика и переход токов от положительных значений к отрицательным происходит достаточно быстро по сравнению с полным оборотом двигателя. При увеличении скорости в качестве оптимального режима управления токами можно использовать векторное регулирование токов. При дальнейшем увеличении скорости можно использовать обычное синусоидальное регулирование тока для уменьшения потерь в электрической машине.

Входами системы управления являются задание момента T_{ref} , и задание потокосцепления ротора $\Psi_r\ ref$. Последний, за вычетом оценки потокосцепления, которая получается из наблюдателя потокосцепления ротора, формирует вход регулятора потока (РП). Выходом РП является задание тока намагничивания или продольного тока асинхронного двигателя по оси d .

Задание момента, в свою очередь, используется для вычисления задания моментобразующего тока по оси q с помощью (1).

Задания токов по осям d и q следует скорректировать по выражениям, рассмотренным в предыдущем подразделе. Наконец, эти задания тока реализуются тремя регуляторами тока для составляющих по осям d , q и нулевой последовательности (PT_d , PT_q и PT_γ). Задания напряжений по осям d и q преобразуются в стационарную систему координат $\alpha\beta$, а затем в задания напряжений для каждой фазы. Каждое задание применяется к своей индивидуальной расщепленной обмотке. Обратная связь для регуляторов тока рассчитывается на основании данных с датчиков тока каждой фазы двигателя в связи с тем, что сумма токов фаз не равна нулю. Токи фаз преобразуются в неподвижную систему координат $\alpha\beta$, а затем в систему координат dq , для реализации обратной связи регуляторов тока. Функциональная схема системы управления представлена на рис. 3.

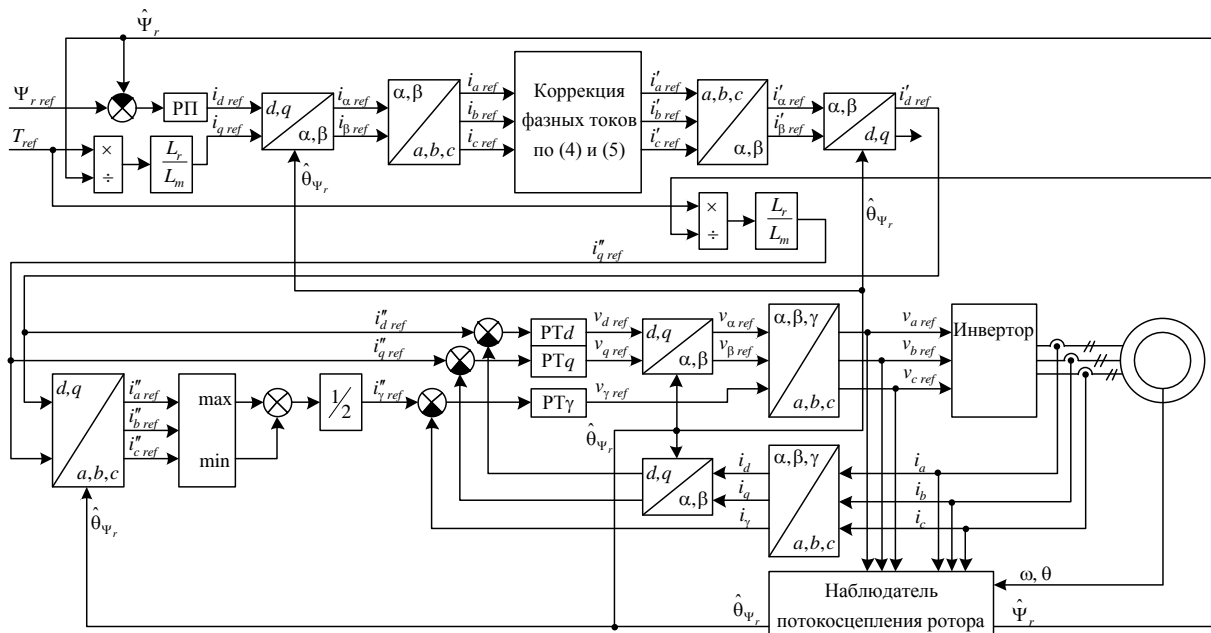


Рис. 3. Функциональная схема системы управления АД с расщепленными обмотками с регулированием токов с приблизительно постоянными потерями.

С. Модель электропривода

Модель электропривода разработана в программном пакете PLECS. Это программное обеспечение позволяет оценивать потери в силовых

полупроводниковых устройствах. Реализация модели синусоидального регулирования тока показана на рис. 4а, тогда как модель регулирования тока с приблизительно постоянными потерями представлена на рис. 4б.

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

Параметры моделирования представлены в таблице 1. Инвертор построен на базе силового модуля SiC MOSFET SAB450M12NM3.

Моделирование рассматривает самосвал, остановившийся на уклоне, как показано на рис. 1а. Таким образом, ротор заблокирован, а система управления реализует заданный момент, равный 1000 Нм. Частота токов статора определяется скольжением в этом режиме работы.

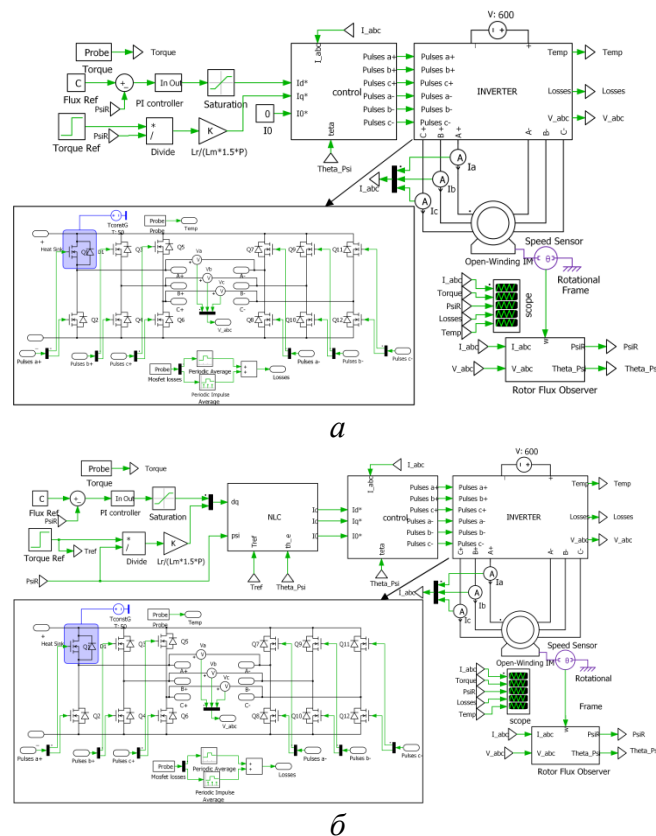


Рис. 4. Модель электропривода с синусоидальным регулированием токов (а) и регулированием токов с приблизительно постоянными потерями (б)

Осциллограммы работы электропривода с синусоидальными токами показаны на рис. 5. Время от 0 до 0,5 с используется для намагничивания асинхронного двигателя. Затем реализуется заданный момент. Создание момента приводит к появлению скольжения. Вектор фазного тока начинает

вращаться с некоторой частотой, пропорциональной создаваемому моменту (примерно 1 Гц в этом эксперименте). Потери в силовом модуле изменяются в диапазоне от нуля до 600 Вт на ключ, а температура кристалла варьируется от 60 до 110 °С.

Таблица 1

Параметры модели

Параметр	Значение
<i>Система управления</i>	
Частота ШИМ	12 кГц
Задание момента	1000 Нм
Задание потокосцепления ротора	0,78 Вб
<i>Инвертор</i>	
Температура радиатора	50 °С
Напряжение ЗПТ	600 В
<i>Электродвигатель</i>	
Сопротивление статора	14,85 мОм
Индуктивность рассеяния статора	0,303 мГн
Сопротивление ротора	9,30 мОм
Индуктивность рассеяния ротора	0,303 мГн
Взаимная индуктивность	10,46 мГн
Номинальная мощность	150 кВт
Число пар полюсов	2

На рис. 6 показаны те же процессы при регулировании тока с почти постоянными потерями. Теперь потери в ключе изменяются от 300 до 600 Вт. Разброс температуры кристалла намного меньше, чем при синусоидальном регулировании тока, и находится в диапазоне от 90 до 110 °С для наихудшего случая.

В обеих системах управления момент стабилизирован. Однако при регулировании тока с почти постоянными потерями невозможно стабилизировать ток намагничивания, поэтому его значение колеблется на низкой частоте вокруг задания.

ВЫВОДЫ

Проблема термоциклирования, актуальная для тяговых асинхронных электроприводов, может быть решена в конфигурации с расщепленными обмотками при использовании тягового инвертора на базе SiC MOSFET. Предложенный метод регулирования тока с приблизительно постоянными потерями значительно снижает амплитуду тепловых колебаний кристаллов в силовых полупроводниковых ключах. В данной конфигурации тягового привода и условиях постановки модельного эксперимента отклонение уменьшилось с 50 до 20 °С. Это соответствует увеличению срока службы силовых полупроводниковых примерно в 20 раз.

Предлагаемый способ регулирования тока можно использовать на малых и нулевых скоростях, тогда как на высоких скоростях целесообразно использовать синусоидальное регулирование тока. Регулирование тока с почти постоянными потерями имеет большие средние потери в ключах, но максимальные потери не больше, чем при синусоидальном регулировании тока.

Дальнейшие исследования будут посвящены экспериментальной проверке предложенного решения с асинхронным двигателем.

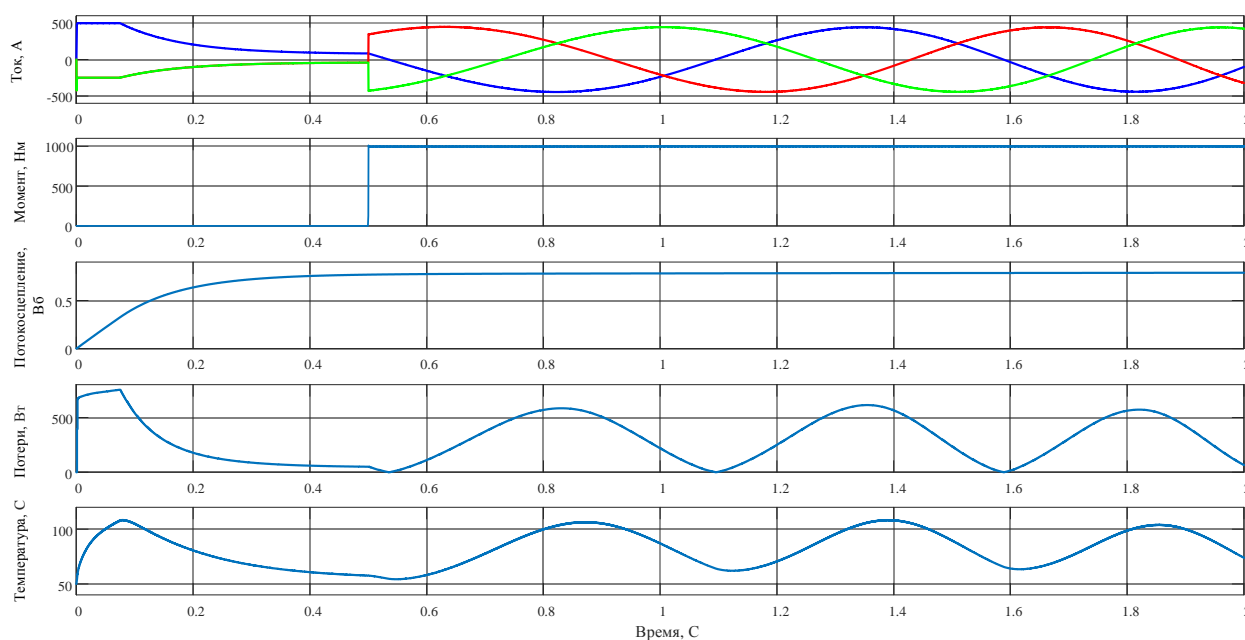


Рис. 5. Результаты моделирования электропривода с синусоидальным регулированием тока

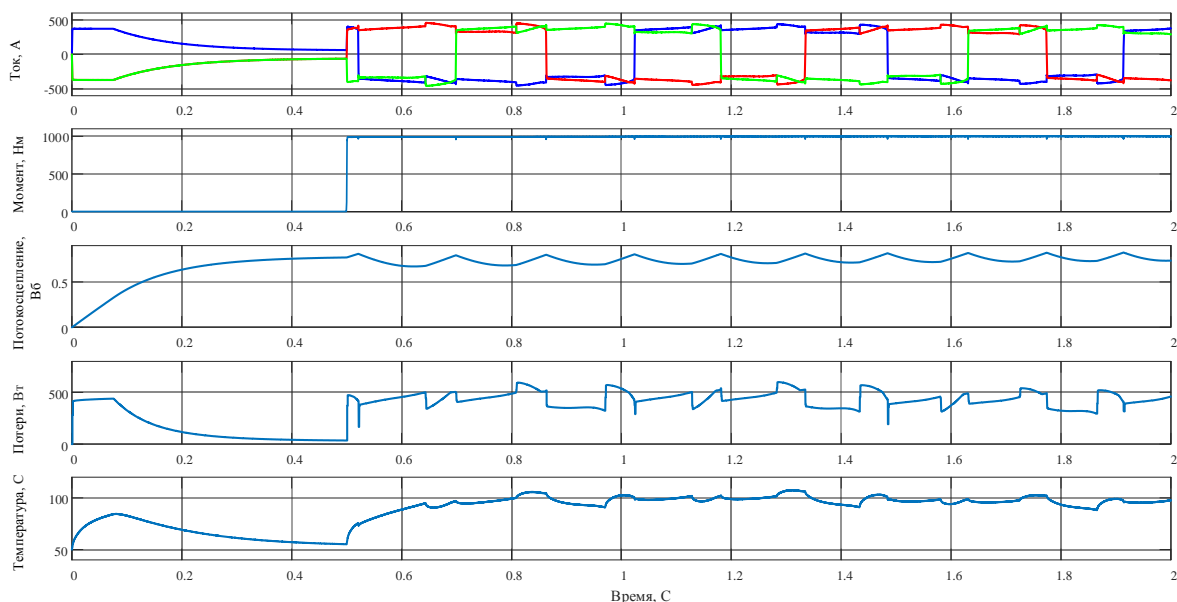


Рис. 6. Результаты моделирования электропривода при работе алгоритма регулирования токов с приблизительно постоянными потерями

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. D. Ronanki, S. A. Singh and S. S. Williamson, "Comprehensive Topological Overview of Rolling Stock Architectures and Recent Trends in Electric Railway Traction Systems," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 3, no. 3, pp. 724-738, Sept. 2017, doi: 10.1109/TTE.2017.2703583.
2. A. B. Vinogradov, N. E. Gnezdov, V. L. Chistoserdov and A. A. Korotkov, "Mining Dump Trucks Electrical Traction Equipment Improvement," 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249279.
3. Li, X., R. Sun, and Y. Wang, A review of typical thermal fatigue failure models for solder joints of electronic components. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2017. 242: p. 012103.
4. I. Vernica, K. Ma and F. Blaabjerg, "Modelling and improvement of thermal cycling in power electronics for motor drive applications," 2016 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2016, pp. 1-8, doi: 10.1109/ECCE.2016.7855259.
5. P. Kumar Prasobhu, V. Raveendran, G. Buticchi and M. Liserre, "Active Thermal Control of GaN-Based DC/DC Converter," in *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 4, pp. 3529-3540, July-Aug. 2018, doi: 10.1109/TIA.2018.2809543.
6. M. Andresen, G. Buticchi, J. Falck, M. Liserre and O. Muehlfeld, "Active thermal management for a single-phase H-Bridge inverter employing switching frequency control," *Proceedings of PCIM Europe 2015; International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management*, 2015, pp. 1-8.
7. A. Anuchin, E. Kulik, H. D. Do, M. Gulyaeva, D. Savkin and F. Blaabjerg, "Increasing Output Torque by Means of Space Vector Current Regulation in an Open-End Winding AC Electrical Machine," 2020 XI International Conference on Electrical Power Drive Systems (ICEPDS), 2020, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICEPDS47235.2020.9249248.
8. E. Kulik, Y. Ali, A. Chepiga, D. H. Do, F. Getmanenko and A. Anuchin, "Current Regulation with Nearly Constant Losses for an Open-end Winding Traction IPM Motor Operating at Low Speeds," 2021 28th International Workshop on Electric Drives: Improving Reliability of Electric Drives (IWED), 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/IWED52055.2021.9376353.

АНАЛИЗ ВАРИАНТОВ ПОСТРОЕНИЯ СИСТЕМ АКТИВНОГО МАГНИТНОГО ПОДВЕСА¹

Аннотация: В статье рассмотрены основные принципы работы, достоинства и недостатки различных типов подвесов. Продемонстрированы их структурные схемы. Также приведены сферы применения и перспективы использования магнитных подвесов. Даны разъяснения основополагающих понятий, таких как левитация, магнитный подвес. Указаны методы достижения устойчивости рассмотренных подвесов.

Ключевые слова: магнитный подвес, левитация, активный магнитный подвес, МП, АМП.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время особый интерес вызывают установки на магнитных подвесах (МП). Это связано с тем, что они позволяют уменьшить потери на трение, обеспечивают малое энергопотребление, существует возможность обеспечить систему автоматическим контролем и мониторингом состояния подшипников.

Принципиально магнитные подшипники подразделяются на два типа: пассивные и активные. Пассивные магнитные подшипники изготавливаются на базе постоянных магнитов. Более гибкие и широкие технические возможности открываются с подшипниками активными, в которых магнитное поле создается переменными токами в обмотках сердечников.

Левитация — это процесс, посредством которого объект удерживается в воздухе без механической поддержки. Для осуществления левитации должна быть обеспечена воздействующая сила, которая противодействует притяжению силы тяжести. Это метод, с помощью которого объект или система подвешиваются без какой-либо поддержки, кроме магнитных полей.

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЙ ПОДВЕС

Электростатический подвес представляет собой устройство, позволяющее удерживать твердое тело во взвешенном состоянии за счет действия

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0838-2020-0006.

электрических сил, создаваемых системой из конечного количества электродов. В основе работы используются силы притяжения между проводящими поверхностями, имеющими различные электрические потенциалы. Одна поверхность принадлежит подвешиваемому проводящему телу, другие поверхности — системе электродов. Как правило, твердое тело является проводником, а в межэлектродном пространстве поддерживается вакуум. Заряд в проводящем теле, находящемся в электрическом поле, распределен таким образом, чтобы внутри тела электрическое поле отсутствовало.

Для создания одноосного электростатического подвеса незаряженного тела его помещают в электрическое поле, созданное двумя парами электродов S_1, S_2, S_3, S_4 (рис. 1). Электроды S_3, S_4 заземлены, а на электроды S_1, S_2 подаются напряжения u_1 и u_2 так, чтобы обеспечить бесконтактный подвес тела вдоль вертикальной оси y .

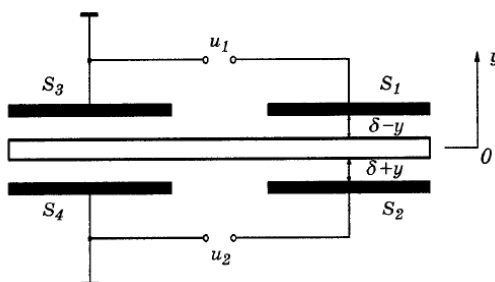


Рис. 1. Четырехэлектродный электростатический подвес электростатический подвес

Пусть площади всех электродов одинаковы и равны A , а в положении $y = 0$ тело находится на одинаковом расстоянии δ от электродов. Тогда выражение для силы, действующей на тело, будет иметь вид

$$F(y) = \frac{A}{16\pi} \left[\left(\frac{u_1}{\delta - y} \right)^2 - \left(\frac{u_2}{\delta + y} \right)^2 \right], \#(1)$$

Функция $F(y)$ монотонно возрастает от $-\infty$ до $+\infty$ при $-\delta < y < \delta$.

При постоянных u_1 и u_2 производная dF/dy на интервале $(-\delta, \delta)$ всюду положительна, поэтому положение равновесия подвеса тела будет неустойчивым. Это заключение основано на теореме Ирншоу.

Теорема Ирншоу. Устойчивое положения равновесия активного элемента невозможно в статическом силовом поле, если сила и расстояние связаны законом обратных квадратов.

Следует заметить, что диэлектрическое тело с диэлектрической проницаемостью меньшей, чем диэлектрическая проницаемость среды, может иметь устойчивое положение равновесия в электростатическом поле.

Устойчивость электростатического подвеса достигается за счет регулирования потенциалами электродов. При этом используют внешнюю систему управления с емкостными датчиками положения.

Достоинства: отсутствие тепловых потерь, отсутствие шума, отсутствие трения, отсутствие магнитного поля и т. д. Недостаток: необходимость в высоких напряжениях и малая грузоподъемность. Свое применение нашли в акселерометрах, циклотроне, поплавковых гироскопах, сферических гироскопах, и т. п.

ПОДВЕСЫ НА ПОСТОЯННЫХ МАГНИТАХ. ЗАПРЕТ ИРНШОУ

В подвесах на постоянных магнитах (ППМ) магнитное поле создается постоянными магнитами или электромагнитами постоянного тока без регулирования. Подвешиваемое тело частично или полностью выполняется из ферромагнитного материала и может нести постоянные магниты. Подвес тела (или частичная разгрузка механических опор) осуществляется за счет магнитных сил отталкивания или притяжения.

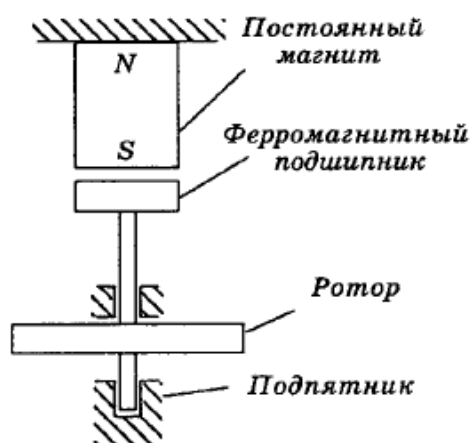


Рис. 2. Разгрузка упорного подпятника с помощью постоянного магнита

Драйсдэйлом и Джоллем в 1924 году для разгрузки упорного подпятника ротора ваттметра предложили систему «магнит — ферромагнетик», она представлена на рис. 2.

На рис. 3 показан Подвес ферромагнитного тела в соленоиде. В горизонтальных направлениях подвес неустойчив. Без специального регулятора может достигаться устойчивость подвеса в вертикальном направлении. Этого можно достичь с помощью участка ab на тяговой характеристике соленоида, на котором положение равновесия может быть устойчивым. Соленоид может питаться как постоянным, так и переменным током. По значению тока в обмотке можно судить о нагрузке на подвешенное тело.

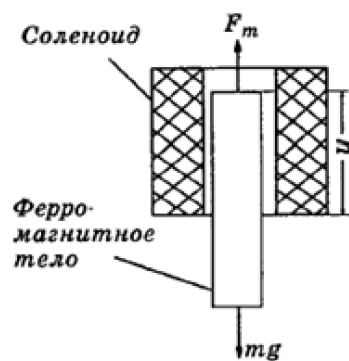


Рис. 3. Электромагнитный подвес соленоидного типа

Устойчивая подвеска тела в постоянном магнитном поле возможна лишь в случае, если магнитная проницаемость материала, из которого изготовлено тело, меньше магнитной проницаемости окружающей среды, т. е. для диамагнетиков и сверхпроводников.

Достоинства: не требуют дополнительных источников энергии для обеспечения левитации. Недостатки: низкая механическая прочность; малая удельная грузоподъемность; не рассеивают механическую энергию при колебаниях подвешенного тела, поэтому нуждаются в специальных демпферах; не позволяют реализовать полную устойчивость неконтактной подвески.

В основном опоры на постоянных магнитах используются как для разгрузки механических опор, так и для измерительных устройств.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОДВЕС С РЕЗОНАНСНОЙ ЦЕПЬЮ

Электромагнитный подвес с резонансной LC-цепью (или LC -подвес) является одним из наиболее простых и не требующим специального регулятора подвесом. Схема LC -подвеса приведена на рис. 4. Подвешиваемое ферромагнитное тело устанавливается между двумя одинаковыми электромагнитами с зазором δ , В цепи обмоток электромагнитов, питаемых переменным напряжением, включены последовательно конденсаторы. Емкость C конденсаторов подбирается такой, чтобы в центральном положении тела действующие значения токов в каждой обмотке, имеющей индуктивность L_0 , находились на ниспадающей ветви резонансной кривой (точка $L_0, I_0...$ на рис. 4). Наиболее выгодное значение тока

$$I_0 = I_m / \sqrt{2}, \#(2)$$

где I_m — максимальное значение тока на резонансном пике.

В положении равновесия силы притяжения электромагнитов F_1 и F_2 равны между собой. Пусть равновесие тела нарушилось, и тело переместилось на расстояние y вправо. Тогда индуктивность L_1 возрастет, L_2 — уменьшится. Изменение же токов и сил будет обратное: ток I_1 и сила F_1 уменьшатся, I_2 и F_2 — возрастут. Результирующая сила притяжения при этом будет направлена влево, и положение равновесия восстановится.

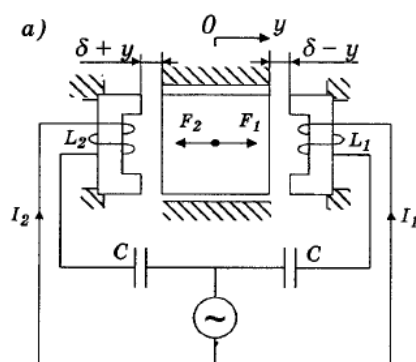


Рис. 4. Электромагнитный резонансный LC-подвес

Достоинство: простота конструкции LC-подвесов. Недостатки: малая грузоподъемность; повышенные потери энергии на вихревые токи и

перемагничивание; малые рабочие зазоры. Поэтому сфера их применения ограничивается слабонагруженными роторами.

АКТИВНЫЙ МАГНИТНЫЙ ПОДВЕС

Работа активного магнитного подвеса или подшипника базируется на принципе электромагнитной левитации — левитации с использованием электрического и магнитного полей. Здесь вращение вала в подшипнике происходит без физического контакта поверхностей друг с другом. Именно по этой причине полностью исключается смазка, а механический износ тем не менее отсутствует. Так повышаются надежность и КПД машин.

Активные магнитные подвесы – это управляемые электромагнитные устройства, в которых удерживается крутящаяся часть машины (ротора) в определенном расположении относительно неподвижной части (статора).

С помощью электронной системы можно управлять магнитными силами притяжения, которые влияют на подвешиваемое тело со стороны электромагнитов. В связи с этим конструктивно активный магнитный подвес состоит из двух основных частей:

1. Электромеханической части (подвешиваемый объект и электромагнит);
2. Электронной системы управления.

Для объяснения принципов действия активных магнитных подвесов рассмотрим рис. 5.

Датчик измеряет смещение подвешиваемого ферромагнитного тела из заданного положения равновесия. Сигнал измерения обрабатывается регулятором. Усилитель мощности, питаемый от внешнего источника электроэнергии, преобразует этот сигнал в управляющий ток в обмотке электромагнита, который вызывает силу магнитного притяжения таким образом, что нарушенное положение равновесия восстанавливается.

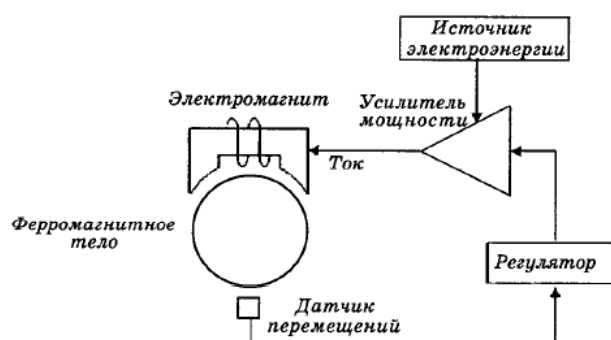


Рис. 5. Принцип действия активного магнитного подвеса

Если сравнивать активный магнитный подвес (АМП) и подвес на постоянных магнитах, а также с LC-подвесом можно заметить такие преимущества, как: грузоподъемность АМП значительно выше и составляет 40–80 Н на 1 см² площади опорной поверхности; высокая механическая прочность; возможность осуществления устойчивой неконтактной подвески тела; возможность изменения жесткости и демпфирования в широких пределах.

Отсутствие потерь на трение и низкое потребление энергии делают АМП перспективными для маховиковых устройств хранения энергии.

Основным преимуществом АМП для применения в станкостроении является высокая точность и высокая скорость вращения при относительно высокой грузоподъемности. Основная область применения — фрезеровальные станки и станки точной обработки мелких деталей.

Основной областью применения АМП в настоящее время является высокоскоростное машиностроение — от небольших турбомолекулярных насосов до турбогенераторов и компрессоров мощностью десятки МВт.

Достоинства: возможность управления вибрациями, демпфирования упругих колебаний, низкое потребление энергии, отсутствие потерь на трение, а также высокая точность и высокая скорость вращения при относительно высокой грузоподъемности.

Недостатки: наличие внешнего источника электроэнергии и относительно более высокие сложность и стоимость, вызванные наличием электронного блока управления. В силу своих неоспоримых преимуществ именно данный вид подвеса наиболее широко применяется в технике.

ИНДУКЦИОННЫЙ ПОДВЕС

Принцип действия индукционного подвеса (ИП) основан на том, что подвешиваемое электропроводное тело помещается в высокочастотное переменное магнитное поле электромагнита, а подвеска осуществляется за счет сил отталкивания основного поля и вихревых токов, наведенных этим полем в подвешиваемом теле (рис. 6). Возможен также обращенный вариант ИП, когда электромагнит, питаемый высокочастотным напряжением, парит над электропроводной поверхностью.

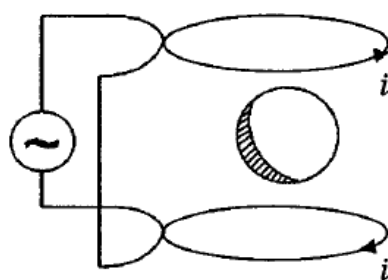


Рис. 6. Индукционный подвес

Следует отметить, что если подвешиваемое тело имеет большую магнитную проницаемость, то кроме отталкивающих силы индукционного характера существует значительная сила, притягивающая тело к электромагниту. Поэтому применение ИП для подвешивания ферромагнитных тел нецелесообразно. Важной областью применения ИП является бестигельная плавка сверхчистых металлов. Суть ее заключается в том, что кусок металла нагревается и плавится индукционным путем за счет энергии магнитного поля подвеса.

Разновидность ИП, состоящая из неподвижного электропроводного рельса и установленного на движущемся экипаже постоянного сверхпроводникового магнита, используется при создании высокоскоростного наземного транспорта с магнитной подушкой.

Достоинства: простота конструкции, способность работать в агрессивных средах и вакууме, а также при больших скоростях, возможность создания опор без трения. Существенный недостаток — большие энергетические затраты

(до 100 Вт на 1 Н нагрузки) — является основным препятствием широкому практическому внедрению ИП.

КОНДУКЦИОННЫЙ ПОДВЕС

Принцип действия кондукционного подвеса (КП) основан на вытеснении проводника с током из магнитного поля (рис. 7). По роду тока КП делятся на подвесы постоянного тока и подвесы переменного тока (магнитное поле и ток должны совпадать по фазе). Так же, как и индукционные подвесы, КП чаще всего используются для бестигельной плавки чистых металлов, но могут быть использованы и в транспортных устройствах.

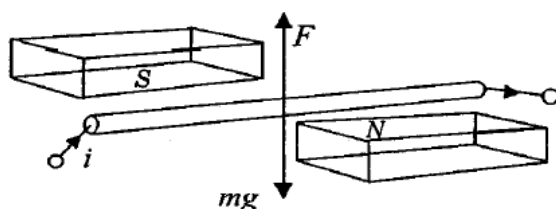


Рис. 7. Кондукционный подвес

Недостаток: необходимость возбуждения токов непосредственно на подвешиваемом теле, что приводит к значительному увеличению собственного веса и снижению эффективности подвеса. Так же к недостаткам можно отнести и необходимость в источнике тока больших значений.

ДИАМАГНИТНЫЙ ПОДВЕС

Принцип действия диамагнитного подвеса (ДП) основан на том, что диамагнетик, помещенный в магнитное поле, намагничивается в направлении, обратном направлению поля, и выталкивается из магнитного поля (рис. 8). Области возможного применения ДП — кинематические датчики и датчики для измерения мгновенных усилий.

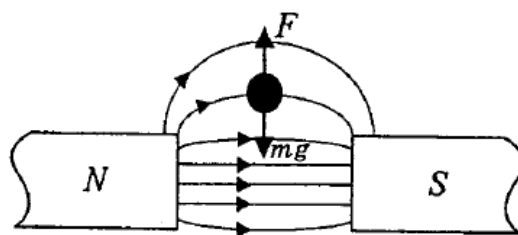


Рис. 8. Диамagnитный подвес

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ ПОДВЕС

Сверхпроводящий подвес (СП) включает в себя сверхпроводник, установленный на подвешиваемом теле, и обычный или сверхпроводящий электромагнит. Принцип действия СП основан на том, что магнитное поле не проникает в тело сверхпроводника и он, таким образом, представляет собой идеальный диамagnetик, который отталкивается магнитным полем. Это обстоятельство снимает запрет Ирншоу и позволяет создавать подвес сверхпроводящего тела без внешней системы стабилизации.

Используется в приборостроении для виброизоляции криогенных чувствительных элементов, предназначенных для навигационных систем и систем управления движущимися объектами, при этом достигается повышение виброизолирующих свойств подвеса путем уменьшения его жесткости.

Недостатки: значительная жесткость подвеса, громоздкость и дороговизна таких установок, что не позволяет применять СП в качестве самостоятельных опор.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ ПОДВЕС В ВЫСОКОСКОРОСТНОМ НАЗЕМНОМ ТРАНСПОРТЕ

Актуальность разработок по созданию высокоскоростного наземного транспорта для скоростей 500 км/ч и более широко известна благодаря печати. Работы по созданию магнитного подвеса вагона ведутся по двум направлениям. В первом — это разработка магнитного подвеса с притяжением — используется принцип активной магнитной опоры (V раздел). Обычные (или сверхпроводящие) электромагниты, установленные на вагоне, притягиваются к ферромагнитному рельсу и подвешивают вагон (рис. 9). Для стабилизации

подвеса применяют систему управления, регулирующую ток магнита. При использовании обычных электромагнитов воздушный зазор мал (порядка 1 см). Для увеличения зазора обычные магниты можно заменить на сверхпроводящие, однако при этом возрастают трудности управления током в сверхпроводящем магните, которое необходимо для стабилизации подвеса.

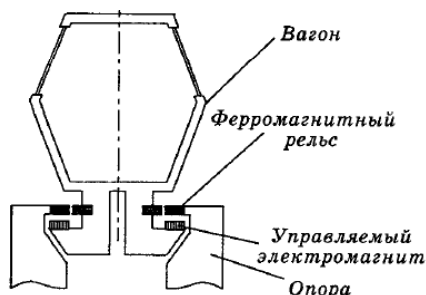


Рис. 9. Магнитные подвесы высокоскоростного наземного транспорта. Вагон с притяжением (или на активном магнитном подвесе)

Во втором направлении — разработка магнитного подвеса с отталкиванием — используется принцип индукционной опоры (раздел VI). Для подвешивания вагона используется сила отталкивания, возникающая между токопроводящим полотном (обычно алюминиевым) и движущимся над ним магнитом под действием поля наведенных вихревых токов. Однако при малых скоростях (менее 80 км/ч) подъемная сила недостаточна, поэтому необходима дополнительная колесная подвеска. Данной системе присуща устойчивость равновесия, поэтому отпадает необходимость в системе стабилизации. Применение сверхпроводящих материалов позволяет увеличить воздушный зазор до 30 см.

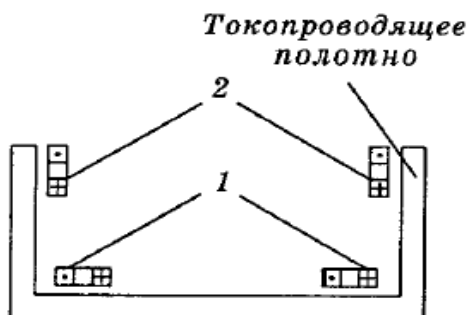


Рис. 10. Магнитные подвесы высокоскоростного наземного транспорта. Магнитный подвес вагона с отталкиванием (или индукционный подвес)

На рис. 10 можно заметить, что магниты 1 обеспечивают подъемную силу и стабилизацию вагона относительно полотна по вертикали, а магниты 2 — стабилизацию по горизонтали.

МАГНИТОГИДРОДИНАМИЧЕСКИЙ ПОДВЕС

Развитие ядерной и МГД-энергетики, и металлургии привело к созданию насосов, дозаторов, перемешивателей и других машин, работающих с жидкими металлами и ионизированными газами при температурах до 1200°C (натрий, калий, литий и др.). Применение здесь обычных подшипников сопровождается значительными трудностями. Логичным решением является использовать в качестве смазочного материала жидкий металл или газ. Однако последние обладают малой вязкостью, а образуемый ими смазочный слой — малой грузоподъемностью. Наложение на смазочный слой магнитных полей, а также пропускание через него электрического тока могут значительно увеличить несущую способность таких опор, называемых магнитогидродинамическими опорами.

Теоретически, существуют четыре направления промышленного применения МГД-генераторов:

1. ТЭЦ и ТЭС с МГД-генератором работающем от продуктов сгорания топлива, подобные устройства достаточно просты и потенциально имеют перспективы массового применения;

2. АЭС с МГД-генератором, работающих от инертного газа, нагреваемого в ядерном реакторе; развитие этого направления в первую очередь зависит от развития атомной отрасли с реакторами, у которых температура рабочего тела выше 2000 К;

3. Термоядерные электростанции безнейтронного цикла с МГД-генераторами, работающими от высокотемпературной плазмы;

4. Установки с МГД-генератором, работающим от жидкого металла, они потенциально полезны в атомной энергетике и специальных энергетических установках сравнительно малой мощности;

5. Гиперзвуковые авиационные системы.

Недостаток: отсутствие материалов для стенок генератора и электродов, способных работать при возникающих сверхвысоких температурах достаточно долгое время.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для создания систем магнитных подвесов для высокоскоростных электродвигателей с высоким удельным показателем, целесообразно использовать активные магнитные подшипники, так как они имеют ряд преимуществ, таких как: возможность управления вибрациями, демпфирования упругих колебаний, низкое потребление энергии, отсутствие потерь на трение, а также высокая точность и высокая скорость вращения при относительно высокой грузоподъемности, возможность осуществления устойчивой неконтактной подвески тела; возможность изменения жесткости и демпфирования в широких пределах.

Тенденция развития современной техники показывают рациональность применения интеллектуальных адаптивных систем управления активным магнитным подвесом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. Н. Журавлев, Активные магнитные подшипники – СПб.: Политехника, 2003. – 206 с.
2. International Journal of Theoretical and Applied Mechanics."A Review of Principles and Illustration of the Physical Working Model of Magnetic Levitation"
3. Бесконтактные магнитные подшипники: устройство, возможности, достоинства и недостатки [Online].Available: <http://electricalschool.info/spravochnik/poleznoe/1891-beskontaktnye-magnitnye-podshipniki.html>
4. К. В. Рыжиков, В. И. Гончаров, Магнитогидродинамические движители. Принцип действия и перспективные области применения.
5. К. К. Ким, Использование магнитного подвеса на транспорте и в электромашиностроении: учеб. пособие; Петербургский государственный университет путей сообщения. – СПб.: ПГУПС, 2002. – 63 с.: ил. – Библиогр.: с. 61-62.

Бадыков Р. Р., Бенедюк М. А., Ломачев А. О., Григорьев Е. М.

Самарский национальный исследовательский университет имени академика С. П. Королева

ИССЛЕДОВАНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КЛАССИЧЕСКОГО И ГИБРИДНОГО ОСЕВЫХ АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ¹

Аннотация: В данной работе представлены результаты разработки и расчета конечно-элементных моделей осевого классического и гибридного активных магнитных подшипников (АМП). Основной целью работы является расчет несущей способности в зависимости от потребной электрической мощности осевого гибридного активного магнитного подшипника новой схемы. В ходе выполнения работы разработана конструкция и двухмерная геометрия гибридного АМП, описан принцип работы гибридного осевого АМП. Численные модели выполнены в программе open-source FEMM 4.2. Заданы геометрические области, созданы конечно-элементные (КЭ) сетки моделей классического и гибридного АМП, выполнены настройки предпроцессора, определены свойства материалов деталей изделия и произведены расчеты. Произведен анализ результатов расчетов и сравнение зависимости несущей способности от потребной электрической мощности гибридного и классического осевого АМП.

Ключевые слова: Магнитный подвес ротора; осевой магнитный подшипник; гибридный магнитный подшипник конечно-элементная модель; FEMM 4.2.

ВВЕДЕНИЕ

Магнитные подшипники имеют огромный потенциал стать ключевым элементом умных и интеллектуальных машин, таких как реактивные двигатели. Несмотря на значительный прогресс, достигнутый в технологии производительности и быстродействию контроллеров, остается множество нерешенных задач в области проектирования и управления магнитными подшипниками. Помимо этого, требуется дальнейшее совершенствование конструкции подшипников данного типа с целью улучшения их характеристик, таких как несущая способность, масса, энергопотребление, жесткость и демпфирование. Одним из путей дальнейшего совершенствования конструкции АМП является изучение и применение в технике гибридных схем с использованием постоянных магнитов [1-5].

Гибридный подшипник так же, как и классический АМП представляет собой активный магнитный подвес двустороннего действия. При смещении

¹Работа выполнена при поддержке Инновационного фонда Самарской области по гранту № 2/22-ИП/2022.

ротора в радиальном или осевом направлении система управления АМП изменяет силу управляющего тока в обмотке электромагнита, что вызывает силу магнитного притяжения и обеспечивает восстановление положения равновесия ротора [6]. Однако в исследуемом гибридном АМП магнитное смещение создается постоянными магнитами с осевой намагниченностью, то есть при нулевом потреблении электроэнергии.

РАЗРАБОТКА И РАСЧЕТ КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНЫХ МОДЕЛЕЙ

КЭ модели осевых классического и гибридного АМП были созданы в свободно распространяемом программном обеспечении Finite Element Method Magnetics - FEMM 4.2 (набор программ для решения низкочастотных электромагнитных задач в двумерной-плоской и осесимметричной постановках).

Программа FEMM 4.2. позволяет решать: линейные/нелинейные магнитостатические задачи, линейные/нелинейные гармонические магнитные задачи, линейные электростатические задачи, и стационарные задачи теплового потока. Решатель программного пакета FEMM при работе с магнитостатическими задачами применяет допущения при использовании уравнений Максвелла. В программе реализовано решение только низкочастотных электромагнитных задач, т.е. задач, в которых влиянием токов смещения можно пренебречь [7].

А. Классическая схема АМП

1) 1 Создание конечно-элементной модели

Для взаимодействия с программами САПР и другими пакетами по созданию сеток конечных элементов FEMM поддерживает импорт и экспорт файлов формата AutoCAD с разрешением DXF. Программа поддерживает работу только с двухмерной геометрией (2D). Для версии программы FEMM 4.2 модуль импорта геометрии с разрешением DXF был создан в соответствии со стандартами DXF 13 версии. Импортированная геометрий приведена на рис. 1.

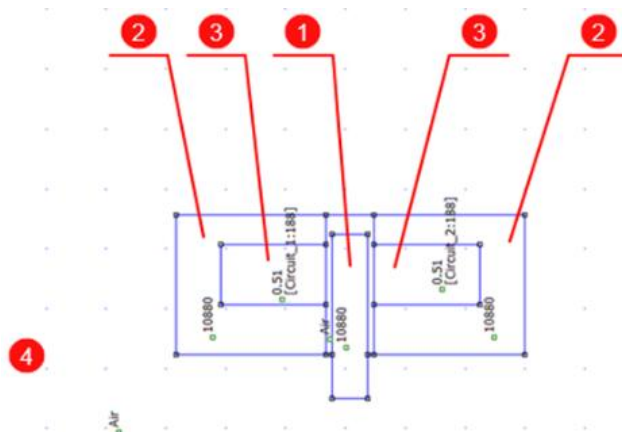


Рис. 1. Импортированная геометрия осевого активного магнитного подшипника:

1 – диск вала; 2 – магнитопроводы осевых электромагнитов; 3 – медная катушка;
4 – окружающая среда (воздух)

Геометрические параметры исследуемого классического АМП приведены на рис. 2.

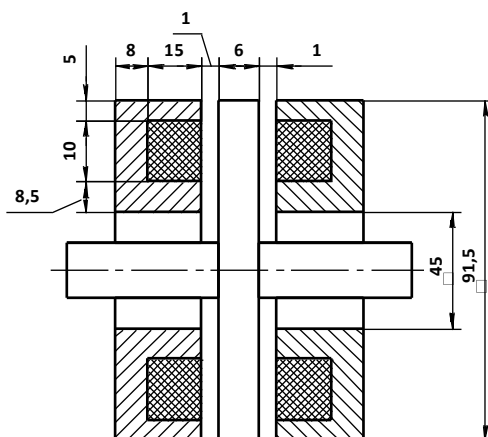


Рис. 2. Геометрические параметры исследуемого классического АМП

В зависимости от задачи необходимо выбрать требуемую постановку: двумерную-плоскую (декартова система координат) для исследования характеристик радиальных магнитных подшипников или осесимметричную (цилиндрическая система координат) для осевых магнитных подшипников.

Далее все настройки будут рассматриваться применительно к задаче исследования характеристик классического осевого магнитного подшипника:

- единицы измерения исследуемой геометрии – миллиметры (мм);
- частота процесса - 0 Гц – постоянное поле для решения магнитоэлектростатических задач;

- точность итерационного решателя или требуемая величина невязок (значение, установленное по умолчанию - $10E-8$);

- минимальный угол вершины конечного элемента, величина которого служит критерием для оценки качества конечного элемента при построении сетки (значение, установленное по умолчанию – 30 градусов). Уменьшение величины угла узла конечного элемента ведет к снижению точности расчета. Не рекомендуется использовать величину угла меньше 20,7 градуса.

- граничное условие «Prescribed A», где $A_0 = A_1 = A_2 = \varphi = 0$ (граничное условие Дирихле);

Для ферромагнитных магнитопроводов, являющихся составляющими классического АМП задавались характеристики в соответствии с свойствами электротехнической стали 10880 ГОСТ 11036-75.

График нелинейной зависимости В-Н приведен на рис. 3.

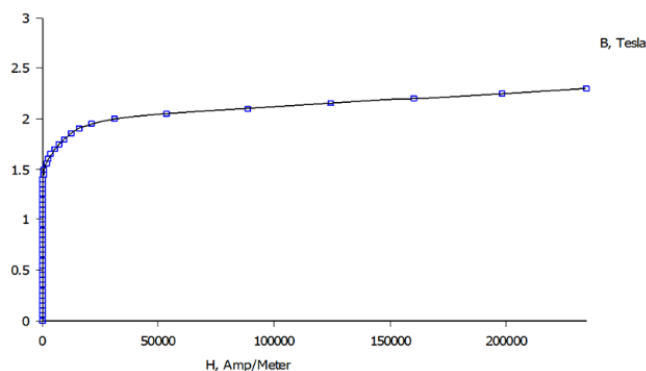


Рис. 3. График нелинейной зависимости В-Н электротехнической стали 10880

Величина коэрцитивной силы (НС - значение напряженности магнитного поля, необходимое для полного размагничивания ферро - или ферромагнитного вещества, измеряется в А/м) задается только для постоянных магнитов, а для магнитопровода электромагнита равна 0.

Плотность тока стороннего источника в области (J, измеряется в А/м²) при постоянном токе для магнитоэлектростатической задачи так же равна 0.

Удельная электропроводность материала (σ , измеряется в См/м) используется в задачах для расчета вихревых токов и для магнитоэлектростатической задачи так же брались равной 0.

Далее задаются параметры шихтования магнитопровода (в том случае, если решается задача с пластинчатым магнитопроводом). В случае анализа характеристик осевого АМП учет шихтования магнитопровода не предусмотрен. При этом необходимо задать опцию «Not laminated or stranded».

Параметры медной катушки:

- линейная зависимость В-Н;
- изотропная относительная магнитная проницаемость $\mu_r = \mu_z = 1$;
- удельная электропроводность провода $\sigma = 58$ МСм/м;
- одножильный провод;
- диаметр провода 0,51 мм;
- количество витков – 188.

Влияние других параметров не учитывается.

Свойства окружающей среды в пределах границ расчетной модели заданы для воздуха:

- линейная зависимость В-Н;
- изотропная относительная магнитная проницаемость $\mu_r = \mu_z = 1$;
- выбрана опция «Not laminated or stranded».

Вследствие того, что классический активный магнитный подшипник состоит из двух электромагнитов и соответственно имеет две электрических цепи были заданы параметры для каждой из цепей в отдельности (2,34 и 0,04 А). Витки в катушках электромагнитов представляют собой последовательную цепь.

В результате была создана конечно-элементная модель классического АМП с импортированными геометрическими параметрами, приведенная на рис. 4. Модель состоит из 12295 элементов и 6293 узлов.

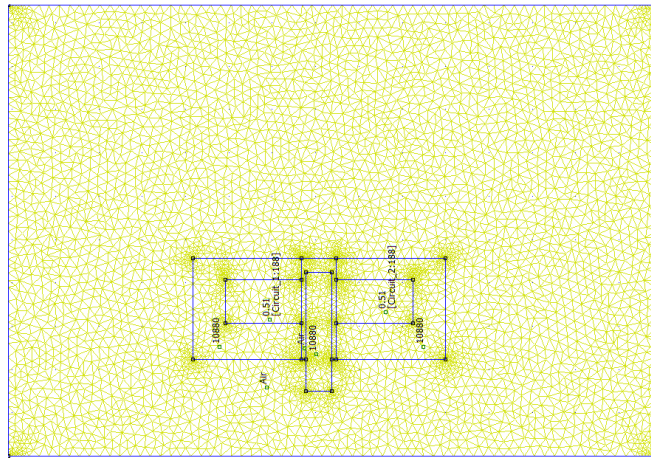


Рис. 4. Конечно-элементная модель классического осевого АМП с заданными материалами

2 Результаты расчета КЭ модели

После подготовки численной конечно-элементной модели произведен расчет несущей способности классической осевого АМП для различных величин сил тока в катушке электромагнитов.

Величина несущей способности подшипника для величины силы тока 2,34 А составляет 63,8 Н (для воздушного зазора 1 мм). Подшипник в данном случае воспринимает внешнюю силу, направленную слева направо. Несущая способность вычисляется посредством интегрирования выделенной области в соответствии с тензором Максвелла. Данный интеграл суммирует силы, действующие на область, полученные из тензора напряжений Максвелла.

Распределение магнитной индукции в АМП представлено на рис. 5.

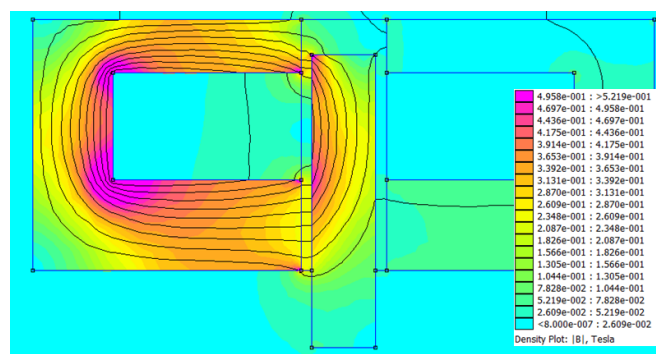


Рис. 5. Распределение магнитной индукции в классическом АМП

Распределение индукции в зазоре в радиальном направлении в середине зазора показано на графике на рис. 6.

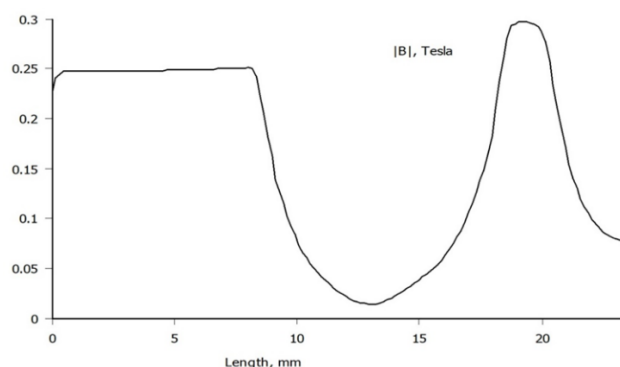


Рис. 6. Распределение индукции в зазоре в радиальном направлении в середине зазора

По графику можно заметить, что в месте наружного полюса значения распределения индукции завышено. Это происходит вследствие того, что в численной модели диаметр диска занижен по сравнению с диаметром наружного полюса. Данное изменение конструкции ротора связано с необходимостью установки проставочного кольца в реальной конструкции магнитного подшипника. Это кольцо надежно фиксирует магниты в своем положении и обеспечивает постоянный воздушный зазор.

На рис. 7 тонкими линиями представлены - линии магнитной индукции, а толстыми вектора магнитной индукции от электромагнитов (вектор магнитной индукции соответствует касательным к линиям магнитной индукции). Внешняя сила, направленная слева направо и приложенная к диску, компенсирует силу притяжения диска к левому электромагниту.

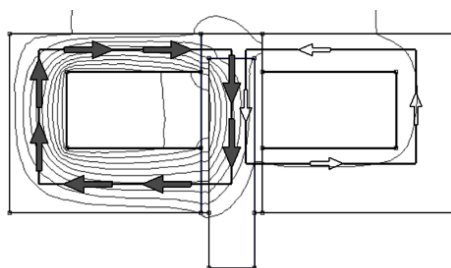


Рис. 7. Вектора магнитной индукции электромагнитов

Сравнение результатов расчета численной модели классического АМП с экспериментальными данными выполнено ранее [8]. Разница между результатами расчета и полученными экспериментальными данными не превысила 8,14 % по несущей способности и 0,9% по потребной мощности.

В. Гибридная схема АМП

1 Описание конструкции гибридного магнитного подшипника

Осевой гибридный АМП, представленный на рис. 8 и 9, состоит из роторной и статорной частей. Ротор включает вал 1 из диамагнитного материала и ферромагнитный диск 2, напрессованный на вал 1 и предназначенный для восприятия осевой силы.

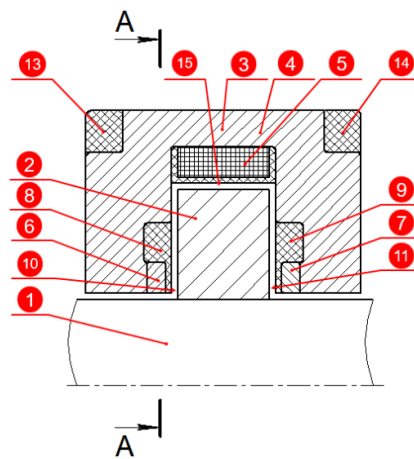


Рис. 8. Продольный разрез осевого гибридного АМП

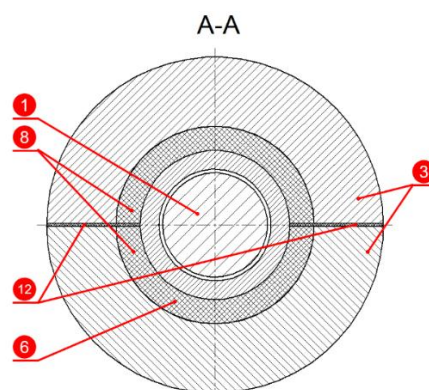


Рис. 9. Поперечный разрез осевого гибридного АМП

Статор содержит магнитопровод 3, катушку 4 с обмоткой 5, кольца – фиксаторы магнитопровода 13, 14, постоянные магниты 6, 7 с осевой намагниченностью, фиксаторы постоянных магнитов 8, 9. Между статором и ротором заданы воздушные зазоры (радиальный 15 и осевые 10, 11).

Магнитопроводы 3 и 4 выполнены из электротехнической стали 10880.

Катушка (изготовлена из диамагнетика, диэлектрика – полиамид-6) 4 с обмоткой 5 установлена в магнитопровод 3 и зафиксирована в осевом направлении.

Внутренняя осевая поверхность катушки 4 и внешняя осевая поверхность диска 2 образуют радиальный магнитный зазор 15.

Во внутренний кольцевой карман магнитопровода 3 устанавливается постоянный магнит 8, выполненный в форме кольца, и фиксируется фиксатором постоянных магнитов 8.

Фиксатор постоянных магнитов 8, изготовленный из диамагнетика (сталь 12Х18Н10Т), прилегает к внешней осевой поверхности кольцевого кармана, расположенного на внутреннем радиальном и внутреннем осевом участках магнитопровода 3.

Внешним торцевым участком постоянный магнит 6 прилегает к радиальной поверхности кармана магнитопровода 3. Внутренний торцевой участок постоянного магнита 6 отделен от диска 2 фиксатором постоянных магнитов 8 и осевым магнитным зазором 10.

Во внутренний кольцевой карман магнитопровода 3 устанавливается постоянный магнит 7, выполненный в форме кольца, и фиксируется фиксатором постоянных магнитов 9.

Внешним торцевым участком постоянный магнит 7 прилегает к радиальной поверхности кармана корпуса 3. Внутренний торцевой участок постоянного магнита 7 отделен от диска 2 фиксатором постоянных магнитов 9 и осевым магнитным зазором 11.

Таким образом, постоянные магниты 6, 7 изолированы от осевых магнитных зазоров 10, 11 подшипника фиксаторами постоянных магнитов 8, 9, выполненных из диамагнетика.

Корпус 3, крышка 4 и фиксаторы постоянных магнитов 11, 12 состоят из двух радиальных сегментов. Между сегментами статора устанавливаются изоляционные прокладки 12. Прокладки 12 по форме полностью повторяют

совокупное продольное сечение магнитопровода 3 и фиксаторов постоянных магнитов 8 и 9, расположены перпендикулярно направлению вихревых токов в ферромагнитных элементах статора, тем самым уменьшая возможные контуры путей и негативное влияние вихревых токов. Фиксацию сегментного магнитопровода 3, фиксаторов постоянных магнитов 8, и изоляционных прокладок 12 в сборе обеспечивают кольца фиксаторы магнитопровода 13 и 14, выполненные из диамагнетика – диэлектрика (полиамид-6).

Для гибридного осевого активного магнитного подшипника, за основу была взята геометрия аналогичного классического магнитного подшипника и далее проводилось последовательное уточнение его характеристик в зависимости от изменения геометрии магнитопровода.

Результатирующие геометрические параметры гибридного осевого АМП представлены на рис 10.

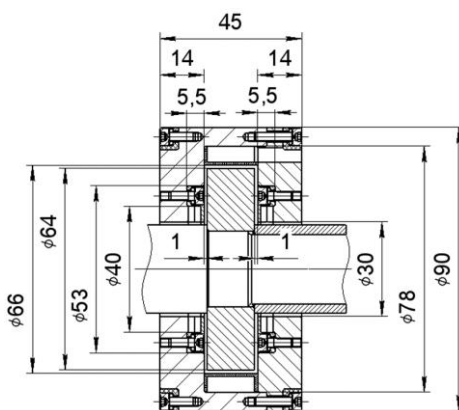


Рис. 10. Результирующие геометрические параметры гибридного осевого АМП

2 Принцип работы осевого гибридного АМП

Подшипник работает по принципу активного магнитного подвеса двустороннего действия. При регистрации смещения ферромагнитного диска 2 система управления изменяет силу управляющего тока в обмотке электромагнита 5, что вызывает силу магнитного притяжения и обеспечивает восстановление положения равновесия ротора.

В разработанном осевом гибридном АМП магнитное смещение (предварительный силовой натяг, необходимый для линеаризации магнитной

силы) создается постоянными магнитами с осевой намагниченностью 6, 7, то есть при нулевом потреблении энергии.

Изменяющийся во времени управляющий магнитный поток, создаваемый обмоткой 5, создает силу противодействия, внешней осевой силе, действующей на ротор.

Следует отдельно отметить, что переменное магнитное поле, вызванное изменением тока в управляющей обмотке и колебаниями ротора относительно центрального положения, приводит к появлению вихревых токов. Согласно закону Джоуля-Ленца, вихревые токи вызывают нагрев проводников, и, следовательно, рост потерь энергии в магнитопроводах, то есть ведут к снижению энергоэффективности подшипника.

Кроме того, магнитные поля вихревых индукционных токов, образующихся в кольцевых ферромагнитных частях подшипника, препятствуют изменению управляющего магнитного потока. С ростом частоты переменного тока намагничивающая сила вихревых токов уменьшает глубину проникновения магнитного поля, что приводит к сокращению площади доступного поперечного сечения магнитопровода, что снижает его магнитную проницаемость и ослабляет создаваемое им магнитное поле.

Вихревые токи также приводят к снижению быстродействия подшипника и, следовательно, уменьшают его динамическую жесткость, так как динамическая жесткость активных магнитных подшипников зависит от частоты изменения тока в управляющей обмотке.

Диапазон частот изменения тока в управляющей обмотке ограничен так называемой шириной полосы пропускания — диапазоном частот, в пределах которого неравномерность частотной характеристики не превышает заданной. В контексте рассмотрения динамической жесткости и ширины полосы пропускания усилитель и непосредственно катушка с управляющей обмоткой рассматриваются как единое целое и обозначаются термином «магнитный привод». Для того, чтобы быстро изменить несущую способность активного магнитного подшипника при изменении внешних сил необходимо также

быстро изменить величину тока в управляющей обмотке. При увеличении частоты изменения тока возрастает индуктивность катушки, что, в свою очередь, приводит к уменьшению величины силы тока. Максимальная частота, при которой магнитный привод сможет работать на максимальной силе тока, обеспечивая максимальную возможную несущую способность называется полосой пропускания магнитного привода.

Таким образом, полоса пропускания — это мера того, насколько быстро магнитный привод отреагирует на изменение внешней силы. Другими словами, полоса пропускания определяет величину динамической жесткости активного магнитного подшипника.

Сегментирование диска (ротора) активного магнитного подшипника зачастую невозможно вследствие прочностных ограничений [9].

Выполнение радиального сегментирования в совокупности с разделением сегментов диэлектрическими изоляционными прокладками позволяет существенно повысить электрическое сопротивление магнитопровода, снизив тем самым величину образуемых в нем вихревых токов за счет уменьшения контуров их путей.

Таким образом, радиальное сегментирование магнитопровода и фиксаторов постоянных магнитов с разделением сегментов диэлектрическими изолирующими прокладками существенно увеличивает ширину полосы пропускания, а следовательно, повышает быстродействие подшипника и его динамическую жесткость, а также дает дополнительный прирост несущей способности подшипника (в среднем на 5 – 10 %) за счет снижения вихревых токов и соответственно, снижения потерь энергии на нагрев магнитопровода, вызванных вихревыми токами [10].

3 Создание конечно-элементной модели

Для создания осевого гибридного АМП были использованы постоянные неодимовые магниты в форме кольца, намагниченные в осевом направлении. Размеры кольца: наружный диаметр кольца 40 мм, внутренний диаметр 30 мм, толщина 2 мм.

Постоянный неодимовый магнит изготовлен из жаростойкого сплава NdFeB (Неодим-Железо-Бор) N38H. Данный сплав работает до температуры в +120°C, (как правило магнитные сплавы Неодим-Железо-Бор работают до +80...90°C). Кольцо покрыто никелем для обеспечения защиты изделия от окисления.

При использовании конечно-элементного анализа наиболее точной моделью представления свойств постоянного магнита является его моделирование как ферромагнитного материала, окруженного током.

Таким образом, кривая размагничивания фактически представляется, как процесс постепенного увеличения магнитодвижущей силы (МДС), действующей в направлении, противоположном полю магнита. В случае полной компенсации действия поля магнитодвижущей силой, такая МДС равна силе, способной сдвинуть постоянный магнит.

Коэрцитивная сила (обозначаемая H_C и задаваемая в А/м) магнита представляет собой абсолютную величину МДС, требуемую, чтобы полностью компенсировать действие поля в магните. Сплавы постоянных магнитов на основе редкоземельных металлов (неодимовые или самариевые) при нормальной температуре имеют линейную кривую размагничивания. Обычно для этих материалов применяют линейные модели. Кроме того, относительная магнитная проницаемость данных материалов близка к 1.

Общие характеристики магнитного сплава N38H, представлены в таблице 1.

Таблица 1

Общие характеристики магнитного сплава N38H

Характеристика	Значение
Остаточная магнитная индукция B_R , Тл	1,22-1,25
Коэрцитивная сила, bH_C , кА/м	≥ 899
Внутренняя коэрцитивная сила iH_C , кА/м	≥ 1353
Магнитная энергия E или $(BH)_{max}$, МегаГаусс-Эрстед	35-37

Таким образом заданы следующие характеристики постоянного магнита:

- линейная зависимость В-Н;
- изотропная относительная магнитная проницаемость $\mu_r = \mu_z = 1,048$;
- выбрана опция «Not laminated or stranded».
- удельная электропроводность провода $\sigma = 0,667$ МСм/м (не учитывается);
- коэрцитивная сила $H_C = 943000$ А/м.

Аналогично конечно-элементной модели классического АМП модель гибридного АМП решалась в осесимметричной постановке (цилиндрическая система координат). Были применены следующие настройки:

- единицы измерения исследуемой геометрии – миллиметры (мм);
- частота процесса - 0 Гц – постоянное поле для решения магнитостатических задач;
- точность итерационного решателя или требуемая величина невязок (значение, установленное по умолчанию - $10E-8$);
- минимальный угол вершины конечного элемента, величина которого служит критерием для оценки качества конечного элемента при построении сетки – 30 градусов;
- граничное условие «Prescribed A», где $A_0 = A_1 = A_2 = \varphi = 0$ (граничное условие Дирихле);
- материал магнитопровода электротехнической стали 10880 ГОСТ 11036-75 (аналогично классическому осевому АМП);
- материал фиксаторов магнитопровода – полиамид 6 - ТУ 6-05-988-87;
- материал фиксаторов постоянных магнитов – сталь 12Х18Н10Т ГОСТ 5632-72.

При этом фактически для магнитостатической задачи характеристики всех диамагнетиков (полиамид 6, сталь 12Х18Н10Т задаются идентичными):

- линейная зависимость В-Н;
- изотропная относительная магнитная проницаемость $\mu_r = \mu_z = 1$;
- выбрана опция «Not laminated or stranded».

- удельная электропроводность провода $\sigma = 0$ МСм/м (не учитывается).

Гибридный осевой АМП, в отличие от классического, имеет одну медную катушку. Параметры медной катушки:

- линейная зависимость В-Н;
- изотропная относительная магнитная проницаемость $\mu_r = \mu_z = 1$;
- удельная электропроводность провода $\sigma = 58$ МСм/м;
- одножильный провод;
- диаметр провода 0,63 мм;
- количество витков – 180.

Влияние других параметров не учитывается.

Величины силы тока в цепи изменялись для получения зависимости несущей способности подшипника от потребной величины электрической мощности.

Таким образом, была создана конечно-элементная модель гибридного осевого АМП, приведенная на рис. 11. Модель состоит из 18703 элементов и 9573 узлов.

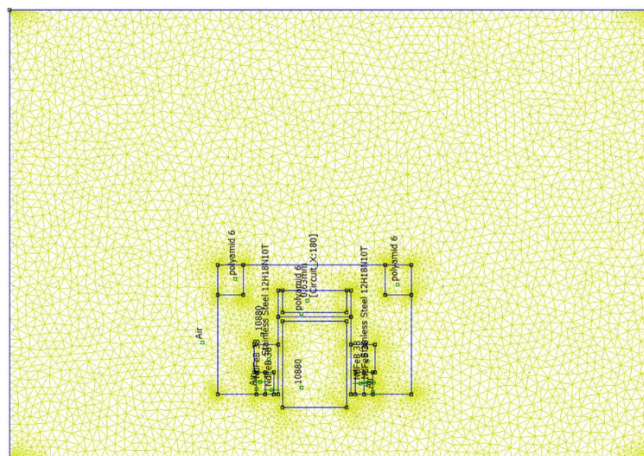


Рис. 11. Конечно-элементная модель гибридного осевого АМП с заданными материалами

4 Результаты расчета КЭ модели

После подготовки численной конечно-элементной модели гибридного осевого АМП произведена серия расчетов с последовательным изменением

геометрии магнитопровода и взаимным расположением постоянных магнитов, магнитопровода и катушки.

Результаты расчета приведены для максимальной силы тока, подаваемой на электромагнит классического осевого АМП в 2,34 А и при зазоре в 1 мм (аналогичного классическому АМП). Общее энергопотребление гибридного подшипника при силе тока в 2,34 А составляет 13,15 Вт.

Величина несущей способности подшипника для величины силы тока 2,34 А составляет 93,29 Н. Подшипник в данном случае воспринимают внешнюю силу, направленную справа налево. Распределение магнитной индукции в гибридном АМП представлено на рис. 12.

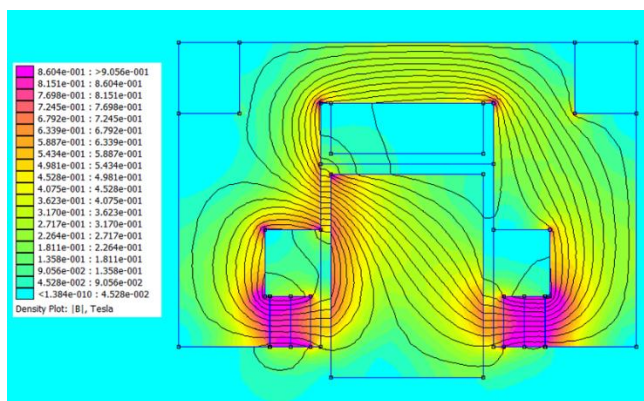


Рис. 12. Распределение магнитной индукции в гибридном АМП

На рис. 13 тонкими линиями представлены линии магнитной индукции, а толстыми - вектора магнитной индукции от электромагнита (вектор магнитной индукции соответствует касательным к линиям магнитной индукции). Внешняя сила, направленная слева на право и приложенная к диску, компенсирует силу притяжения диска к левому постоянному магниту.

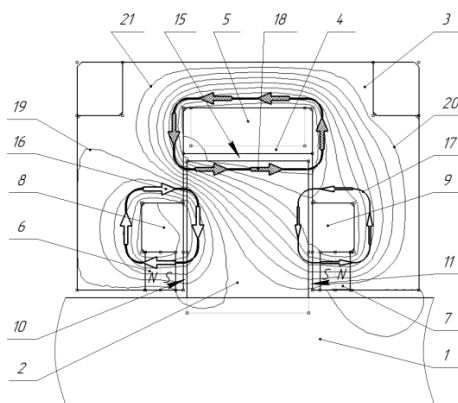


Рис. 13. Вектора магнитной индукции в гибридном АМП

Магнитное поле, создаваемое управляющей обмоткой 5, усиливает магнитное поле постоянного магнита 6 и ослабляет магнитное поле постоянного магнита 7. Это происходит за счет сложения векторов магнитной индукции 18, 16 управляющей обмотки 5 и постоянного магнита 6, действующих в одном направлении в области осевого магнитного зазора 10, и вычитания векторов магнитной индукции 18, 17 управляющей обмотки 5 и постоянного магнита 7, действующих в области осевого магнитного зазора 11 в противоположном направлении.

В результате формируется суммарная осевая сила магнитного притяжения, действующая на диск 2 в направлении, противоположном направлению действия внешней осевой силы, компенсирующая ее и возвращающая ротор в положение равновесия.

Распределение магнитной индукции в гибридном АМП для конструктивного исполнения без карманов представлено на рис. 14. Для данного конструктивного исполнения величина несущей способности подшипника при силе тока 2,34 А в обмотке составляет 65,27 Н.

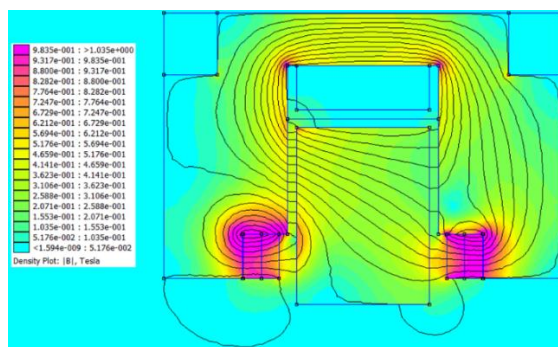


Рис. 14. Распределение магнитной индукции в гибридном АМП для конструктивного исполнения без карманов

За счет выполнения в магнитопроводе 3 кольцевых карманов, в которые установлены диамагнитные фиксаторы постоянных магнитов 8 и 9, потоки векторов магнитной индукции 16, 17 постоянных магнитов 6, 7 проходят через постоянные магниты 6, 7 и образуют замкнутые контуры вокруг фиксаторов постоянных магнитов 8, 9. Таким образом, происходит перераспределение магнитных полей постоянных магнитов 8, 9 на больший диаметр, а следовательно, магнитные поля постоянных магнитов 8, 9 взаимодействуют с магнитным полем управляющей обмотки 5 по большей площади, что выражается в увеличении магнитной индукции суммарного магнитного поля, а также силы магнитного притяжения, действующей на диск 2, и, следовательно, в росте несущей способности подшипника.

На рис. 15 представлен график зависимости несущей способности гибридного осевого АМП от потребной электрической мощности, подаваемой на обмотку электромагнита, для двух конструкций: с карманами в магнитопроводе, заполненными диамагнетиком и без карманов (сплошной магнитопровод). При этом данная характеристика рассчитывалась для осевого воздушного зазора между диском ротора и магнитопроводом 0,5 мм, при прочих неизменных геометрических параметрах. Данная величина осевого зазора наиболее часто применяется в системах с использованием осевого АМП.

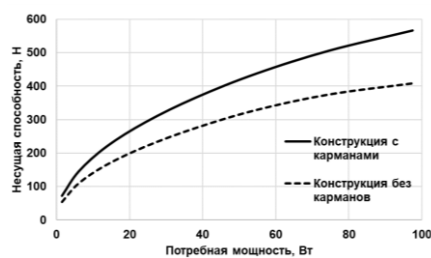


Рис. 15. График зависимости несущей способности гибридного осевого АМП от потребляемой электрической мощности

Следует также отметить, что наличие карманов позволяет удобно разместить и зафиксировать постоянные магниты относительно магнитопровода.

АНАЛИЗ РЕЗУЛЬТАТОВ, РАСЧЕТ И СРАВНЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ГИБРИДНОГО И КЛАССИЧЕСКОГО ПОДШИПНИКА

Сравнение результатов зависимости несущей способности от потребляемой электрической мощности приведено для осевого воздушного зазора в 0,5 мм. На рис. 16 представлен график зависимости несущей способности гибридного осевого АМП от потребляемой электрической мощности, подаваемой на обмотку электромагнита, для двух конструкций: с карманами в магнитопроводе, заполненными диамагнетиком и без карманов (сплошной магнитопровод). В таблице II приведены соответствующие значения потребляемой электрической мощности и несущей способности.

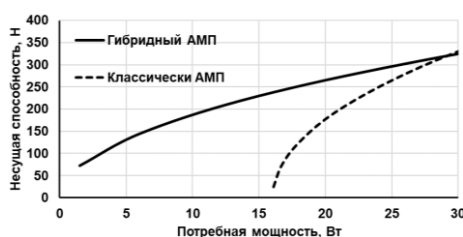


Рис. 16. График зависимости несущей способности гибридного осевого АМП от потребляемой электрической мощности

Таблица 2

Результаты численного расчета классического и гибридного АМП

Потребная электрическая мощность, Вт		Несущая способность, Н	
<i>Классический АМП</i>	<i>Гибридный АМП</i>	<i>Классический АМП</i>	<i>Гибридный АМП</i>
16	1,5	24	73
17	6,1	71	146
18	13,7	118	220
20	24,4	177	293
23	38,1	236	366
27	54,8	295	438
32	74,6	354	506
-	97,4	-	566

Для данных активных магнитных подшипников несущая способность на номинальном режиме работы при зазоре в 0,5 мм составляет 150 Н. Несущая способность на максимальном режиме работы составляет 300 Н. Таким образом, потребная мощность классического активного магнитного подшипника составляет 19 Вт, в то время, как потребная мощность гибридного АМП на номинальном режиме работы составляет 6,5 Вт. Следовательно, гибридный подшипник более эффективен в плане потребления электроэнергии на 65% на номинальном режиме работы. Потребная мощность на максимальном режиме работы у классического АМП составляет 27,5 Вт, а у гибридного АМП составляет 25,5 Вт (гибридный подшипник эффективнее на 7,2 %). В зависимости от назначения, режима работы, требуемой величины несущей способности, ограниченности по диаметрам установки подшипников эффективность энергопотребления гибридного АМП может изменяться в широком диапазоне величин по сравнению с классическим осевым АМП.

В таблице III приведено сравнение габаритных размеров гибридного и классического АМП (наружного диаметра и длины).

Таблица 3

Сравнение габаритных размеров гибридного и классического АМП

Параметр	Классический АМП	Гибридный АМП
Наружный диаметр, мм	91,5	90
Длина, мм	58,2	45

В гибридном подшипнике использование постоянных магнитов позволяет убрать дополнительную медную катушку, в результате чего необходимая длина магнитопровода сокращается. Для рассматриваемой геометрии магнитов длина гибридного подшипника уменьшилась на 13,2 мм по сравнению с классическим. При этом масса магнитного подвеса изменилась не сильно: уменьшилась на 50 граммов. Однако масса всей установки сокращается за счет уменьшения количества необходимых внешних блоков питания.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработана численная конечно-элементная осесимметричная модель осевого гибридного АМП в программном пакете FEMM 4.2. Так же, как и модель для классического АМП, созданная модель позволяет получить величины распределения магнитной индукции, мощности и несущей способности, используя геометрические данные магнита и характеристики обмотки.

2. Для разработанной конструкции классического и гибридного АМП при воздушном зазоре в 0,5 мм величина несущей способности на номинальном режиме работы составляет 150 Н. Потребная мощность на номинальном режиме работы классического АМП составляет 19 Вт, в то время, как необходимая мощность гибридного АМП составляет 6,5 Вт. Следовательно, гибридный подшипник более эффективен в плане потребления электроэнергии на 65% на номинальном режиме работы. В зависимости от назначения, режима работы, требуемой величины несущей способности, ограниченности по диаметрам установки подшипников эффективность энергопотребления гибридного АМП может изменяться в широком диапазоне величин по сравнению с классическим осевым АМП.

3. Габаритная длина гибридного подшипника сократилась на 22,6 % по сравнению с классическим при сходных наружных диаметрах. При этом массы магнитных подшипников отличаются не сильно: 1,787 кг – классический;

1,738 кг гибридный. Однако масса всей установки сокращается за счет уменьшения в 2 раза количества потребных блоков питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Журавлев Ю.Н., Активные магнитные подшипники. Теория, расчет, применение. СПб., Политехника, 2003.
2. A. Kenny and A. Palazolo, Single plane radial, magnetic bearings biased with poles containing permanent magnets // *Journal of Mechanical Design*. – 2003. – Vol. 125, pp.178-185. – DOI:10.1115/1.1541630.
3. P. Allaire, B. Nichols, T. Dimond, et. al. Low cost active magnetic bearings- concepts and examples – 2016. – [Online]. Available: <https://rotorsolution.com/wp-content/uploads/2017/03/PM-Bias.pdf>.
4. B.R. Nichols, P.E. Allaire, T. Dimond, et. al., Performance and cost reduction of permanent magnet biased magnetic bearings // *Proceedings of the ASME Turbo Expo*. – 2017. – Vol. 7A. - <https://doi.org/10.1115/GT2017-64050>.
5. V. Amoskov, D. Arslanova, G. Baranov, et. al., Modelling EMS maglev systems to develop control algorithms // *Cybernetics and Physics*. – 2018. – vol. 7. - No. 1, pp. 11-17. - DOI:10.35470/2226-4116-2018-7-1-11-17.
6. R. Parente, Stability of a magnetic suspension device / R.B. Parente // *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*. – 1969. – Vol. AES-5, Issue 3. – P. 474-485. – DOI: 10.1109/TAES.1969.309850.
7. D. Meeker, Finite Element Method Magnetics Version 4.2, User's Manual – 2020. – [Online]. Available: <https://www.femm.info/wiki/Documentation/>.
8. R. Badykov, Development of AMB Test Unit for the Numerical Model Validation / R. Badykov, A. Lomachev, M. Benedyuk, K. Bezborodova, A. Yurtaev // *2022 International Conference on Dynamics and Vibroacoustics of Machines, DVM 2022*. – 2022. – P. 1-6. – DOI 10.1109/DVM55487.2022.9930928.
9. H. Bleuler, A survey of magnetic levitation and magnetic bearing types / H. Bleuler // *JSME International Journal Series III*. – 1992. – Vol. 35, no. 3. – P. 335-342. – DOI: <https://doi.org/10.1299/jsmec1988.35.335>.
10. G. Schweitzer, E.H. Maslen, *Magnetic Bearings. Theory, Design, and Application to Rotating Machinery*. Springer Dordrecht Heidelberg London New York, 2009. DOI 10.1007/978-3-642-00497-1;

*Кадыров А. А., Поздышев Е. В., Булатов Г. Р., Бояришинов Е. А., Калмантаев А. В.,
Фаррахов Д. Р.*
АО «УППО»

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЭЛЕКТРОННЫЙ СИЛОВОЙ МОДУЛЬ МОЩНОСТЬЮ 30 кВт ДЛЯ ЭЛЕКТРОЗАРЯДНЫХ СТАНЦИЙ¹

Аннотация: АО «УППО» совместно с НИИ «ЭТКиС» ведет разработку универсального электронного силового модуля мощностью 30 кВт (УЭСМ-30), основным применением которого являются зарядные станции для электромобилей быстрого типа. Дополнительная сфера применения УЭСМ-30 – зарядные станции для электробусов, системы резервирования электропитания для промышленных потребителей

Ключевые слова: Силовой модуль, Резонансный преобразователь, Зарядные станции для электромобилей, ЭЭС.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие электрического транспорта в России идет быстрыми темпами, по состоянию на сентябрь 2022 в РФ эксплуатируется более 18 тысяч электромобилей (данные от компании It-Charge[3]). В Республике Башкортостан, по данным Госавтоинспекции, зарегистрировано 250 электромобилей на 01.11.2022г. Правительством Российской Федерации принята Концепция по развитию электротранспорта в Российской Федерации, по которой до 2030 года в стране должно работать 28 тысяч быстрых зарядных станций. [1] В настоящее время в пилотных регионах действует программа субсидированной установки быстрых зарядных станций мощностью 150 кВт. [2] По данным Министерства Промышленности и Торговли РФ в 2022 году установлено более 1000 таких станций. Проанализировав схемотехнические решения разных производителей ЭЭС, был сделан вывод, что все станции строятся по модульному принципу, на основе силовых модулей мощностью 30 кВт. Основными поставщиками силовых модулей на российский рынок являются производители дружественных (Scypower, Infypower), производитель Phoenix Contact также имеет в своей линейке силовой модуль мощностью 30 кВт, однако более не поставляет продукцию в Россию.

¹Работа выполняется при частичной поддержке Министерства Промышленности и Торговли Российской Федерации по субсидии П.П.1252.

АО «УППО» выиграло конкурс субсидий Министерства Промышленности и Торговли РФ по теме «Разработка и постановка на производство универсального электронного силового модуля мощностью 30 кВт» и ведет данную работу совместно с представителями НИИ «ЭТКиС».

ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

Требования к УЭСМ-30 вырабатывались с учетом особенностей российского климата, а также специфических требований для применения в ЭЭС для электробусов – возможность питания от троллейбусной линии 600 В. Помимо этого, поставлена задача конкурентоспособной цены УЭСМ-30 в сравнении с зарубежными аналогами.

А. Основными требованиями к модулю УЭСМ-30 производства АО «УППО» является:

- модульная конструкция (расширяемость системы), которая обеспечивает возможность параллельного включения до 10 модулей для увеличения общей выходной мощности. По требованиям заказчика могут быть поставлены УЭСМ-30 в количестве 1-10 шт. для ЭЭС 30, 60, 90, 120, 150 кВт – до 300 кВт;

- *применение электронной компонентной базы (далее по тексту – ЭКБ) отечественного производства и производителей дружественных стран;*

- *собственное программное обеспечение;*

- *универсальные посадочные места на печатных платах (для установки ЭКБ в зависимости от определенного набора комплектации);*

- *оперативное техническое обслуживание (быстрая замена модуля при выявлении неисправности);*

- *высокий срок службы (10 лет);*

- *высокий КПД;*

- *схемотехническое резервирование в критичных узлах;*

- универсальность входного питания как от 3-х фазной линии переменного тока, так и от троллейбусной и трамвайной контактной сети постоянного тока.

В. Требования к компонентной базе

При разработке УЭСМ-30 планируется применение следующих компонентов, включенных в Реестр российской радиоэлектронной продукции (таблица 1)

Таблица 1

Компоненты, включенные в Реестр российской радиоэлектронной продукции

№ п/п	Наименование используемого компонента	Номер реестровой записи	Наименование производителя
1.	Микросхема 32-разрядный микроконтроллер на базе ядра ARM Cortex-M4F K1921BK01T	4066\1\2021	АО «НИИЭТ»
2.	Микросхема интегральная K5559ИИ14АSI	81\3\2022	АО «ПКК «Миландр»
3.	Микросхема интегральная K1986BE92QI	323\5\2021	АО «ПКК «Миландр»
4.	Микросхемы интегральные серии GM1117S-xx (GM1117S-3.3TC3T)	4359\2\2021	АО «Микрон»
5.	Микросхема интегральная серия GM5510C-xx (GM5510C-2.0ST23R)	509\3\2022	АО «Микрон»
6.	Микросхема интегральная GM432AST23RG	4359\3\2021	АО «Микрон»
7.	Микросхема интегральная GM358S8RG	509\7\2022	АО «Микрон»
8.	Резисторы постоянные непроволочные P1-12	108\70\2022	АО НПО «Эркон»
9.	Резисторы постоянные непроволочные P1-154	108\10\2022	АО НПО «Эркон»
10.	Соединитель СНП347 (вилки, розетки)	320\12\2022	АО "КАРАЧЕВСКИЙ ЗАВОД "ЭЛЕКТРОДЕТАЛЬ"
11.	Соединитель СНП389 (вилки, розетки)	320\3\2022	АО "КАРАЧЕВСКИЙ ЗАВОД "ЭЛЕКТРОДЕТАЛЬ"
12.	Соединитель СНП391 (вилки, розетки)	320\1\2022	АО "КАРАЧЕВСКИЙ ЗАВОД "ЭЛЕКТРОДЕТАЛЬ"

С. Импортная элементная база

Помимо вышеприведенных компонентов (а также в случае их недоступности) планируется применение импортных комплектующих, в основном китайского производства. Налажен контакт с несколькими зарубежными производителями комплектующих, в частности, производителей силовых компонентов из карбида кремния, таких как Anbon Semiconductor, Inventchip, силовых разъемов – Anfeite.

Д. Конструктив

Планируется применение стандартного корпуса в 19”стойку формата 3U глубиной 540 мм. (Рисунок 1). Охлаждение с помощью трех вентиляторов по датчику температуры. Управление осуществляется по шине CAN



Рис. 1. Внешний вид УЭСМ-30 (концепт)

Е. Структура УЭСМ-30

УЭСМ-30 состоит из следующих функциональных узлов. А) Активный выпрямитель с корректором коэффициента мощности, построенный по схеме Виена Б) Преобразователь постоянного тока, схема резонансного преобразователя, для уменьшения габаритов преобразователя планируется на выходе применить от 4 до 8 трансформаторов. На выходе силовых трансформаторов устанавливается двухполупериодный выпрямитель на силовых диодах из карбида кремния.

Ф. Описание УЭСМ-30

Планируемый к созданию в рамках настоящего комплексного проекта Универсальный электронный силовой модуль мощностью 30 кВт.

УЭСМ-30 представляет модульную конструкцию, которую можно упаковать в корпуса 3U для установки в 19-дюймовую стойку.

УЭСМ-30 имеет силовые входы на 380 В переменного тока и на 600 В постоянного тока. Выходные клеммы УЭСМ-30 рассчитаны на напряжения 50-1000 В постоянного тока. Помимо этого, имеется разъем управления типа RJ-45 для шины управления CAN.

Протокол обмена по шине CAN - собственной разработки. Описание протокола обмена доступно для просмотра и изучения покупателями модуля.

Возможные варианты применения УЭСМ-30:

А) Работа в составе зарядных станций, независимо от производителя, для электромобилей мощностью 30-150 кВт, работающих по 3 основным стандартам зарядки электромобилей: GB/T, CHAdeMO и CCS;

Б) Работа в составе модульных зарядных станций для электробусов (мощность 150-300 кВт)

В) Работа в составе модульных систем накопления электрической энергии в системах резервирования электропитания (для заряда аккумуляторных батарей) для промышленных потребителей.

Краткое описание каждого вида продукции:

УЭСМ-30 должен осуществлять заряд тяговой аккумуляторной батареи в соответствии с системой зарядки постоянного тока типа А от трехфазной сети 260-480В 50/60 Гц либо от сети постоянного тока 400-800 В (напряжение троллейбусной линии) с ограничением входного и выходного токов и выходного напряжения.

Основное применение: УЭСМ-30 входит в состав электрочарядной станции мощностью 30-150 кВт и обеспечивает задание напряжения и тока заряда тяговой аккумуляторной батареи электромобиля. Значения напряжения и тока заряда получаются контроллером ЭЭС от подключенного электромобиля и передаются по шине CAN в подключенные УЭСМ-30. УЭСМ могут быть

включены до 5 штук параллельно для обеспечения суммарной мощности зарядной станции 150 кВт.

Помимо основного применения, существует возможность применения УЭСМ-30 в системах резервирования электропитания для промышленных потребителей. В настоящее время сокращают присутствие на рынке России западные производители систем резервирования электропитания и накопителей электроэнергии, такие как ООО «Беннинг Пауэр Электроникс». По характеристикам УЭСМ-30 подходит для применения в модульных системах накопления электроэнергии (например, ИБП ENERTRONIC modular Storage имеет диапазон мощностей 20...500 кВт – по количеству модулей, диапазон напряжений на выходе 396-691 В).

Назначение каждого вида продукции:

УЭСМ-30 предназначены для производителей ЭЭС для упрощения изготовления последних, по принципу конструктора, с получением требуемой заказчику мощности. К примеру, для заряда широко распространенного в России электромобиля Nissan Leaf достаточно мощности 60 кВт, таким образом, для такой зарядной станции нужно 2 УЭСМ-30. В Концепции по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года предусмотрена субсидированная установка быстрых зарядных станций мощностью от 149 кВт, для такой зарядной станции необходимо 5 штук УЭСМ-30.

Помимо модульных зарядных станций возможно применение УЭСМ-30 в модульных накопителях электроэнергии.

Особенности (уникальность) каждого вида продукции:

В настоящее время на территории РФ не производятся универсальные силовые модули для электрочарядных станций. Производители ЭЭС либо разрабатывают собственные силовые модули под определенную мощность (в основном – 50 кВт), либо покупают силовые модули китайского производства, также присутствовали на рынке решения Phoenix Contact, но в настоящее время они ушли с рынка РФ.

НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЕ И ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ЗАДАЧИ

Одной из важнейших задач при изготовлении преобразователей электрической энергии большой мощности являются: КПД, коэффициент мощности ($\cos\varphi$), а также выполнение требований по электромагнитной совместимости изделия в соответствии со стандартами:

- излучение электромагнитных помех ГОСТ 30804.6.3- класс В;
- помехоустойчивость в соответствии с ГОСТ 30804.6.1;

Кроме того, при разработке УЭСМ-30 следует учитывать возможные быстрые изменения нагрузки, стабильность работы, а также широкий температурный диапазон $-40... +75\text{ }^{\circ}\text{C}$

Для управления УЭСМ планируется применить высокоскоростную шину CAN, обеспечить последовательное подключение нескольких модулей (daisy chain).

При разработке УЭСМ применяются как электронные компоненты отечественного производства, так и при отсутствии необходимых компонентов – импортных комплектующих, преимущественно китайского производства. При этом, по мере появления на российском рынке отечественных комплектующих, планируется в течение срока выполнения комплексного проекта замещение иностранных комплектующих отечественными с проведением типовых испытаний в соответствии с ГОСТ Р 15.201-2000.

Полный цикл производства УЭСМ-30 планируется освоить на территории АО «УППО», включая изготовление корпусов, печатных плат, сборку и настройку.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года, утвержденная распоряжением Правительства РФ от 23.08.2021г. URL:
2. <http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf>
3. Постановление Правительства РФ от 21 марта 2022 г. N 431 URL:
4. <http://government.ru/docs/all/140043/>
5. URL: <https://www.itcharge.ru>

Михайлов А. Е., Горюнов И. М., Васильева Е. Д., Подгузов А. А.
Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ОБЛИКА ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ДЛЯ РЕГИОНАЛЬНОГО ТУРБОВИНТОВОГО САМОЛЕТА ТИПА DE HAVILLAND DASH-81

Аннотация: Авторами проведен анализ работ в области создания гибридных силовых установок для турбовинтовых региональных самолетов. В работе рассмотрена проблема выбора облика и программы управления гибридной силовой установкой параллельной схемы для турбовинтового пассажирского самолета типа De Havilland Dash 8. Проведено параметрическое исследование по формированию облика турбовинтового двигателя при различной степени гибридизации, расчет эксплуатационных характеристик двигателя по типовой траектории полета. Проведена оценка гибридных силовых установок с различной степенью гибридизации и программой управления по критериям эффективности летательного аппарата

Ключевые слова: гибридная силовая установка, турбовинтовой двигатель, концептуальное проектирование.

ВВЕДЕНИЕ

В процессе эволюции пассажирских самолетов с реактивными двигателями достигнуто уменьшение затрат топлива на пассажиро-километр более чем на 80%, и почти 50% снижения этого показателя достигнуто за счет авиационного двигателя [1]. Улучшение показателей гражданских двигателей происходит при постоянном ужесточении требований к уровню шума и эмиссии вредных веществ. В настоящее время экологические характеристики авиационной техники являются одним из главных показателей, определяющих ее конкурентоспособность на мировом рынке [2, 3].

В Евросоюзе развитие авиационной отрасли осуществляется в соответствии со стратегическими программами Европейского консультативного совета по исследованиям в области авиации ACARE, в США координацию программ развития осуществляет NASA. В 2011 году ACARE утверждена программа Flightpath 2050, были установлены долгосрочные цели по снижению негативного воздействия авиационной отрасли на окружающую среду, рисунок 1 [4].

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

Как можно видеть на рисунке 1, к 2050 году планируется существенное снижение выбросов CO_2 и NO_x , а также генерируемого уровня шума авиационных двигателей.

GOALS		TECHNOLOGY BENEFITS RELATIVE TO A YEAR 2000 REFERENCE AIRCRAFT		
	VISION 2020	FLIGHTPATH 2050		
CO ₂ reduction per passenger km	-50%	-75%		
NO _x reduction	-80%	-90%		
Noise reduction ²	-50%	-65%		
Taxiing		Emission-free		

GOALS	N+1 = 2015 Technology Benefits Relative to a Single Aisle Reference Configuration	N+2 = 2020 Technology Benefits Relative to a Large Twin Aisle Reference Configuration	N+3 = 2025 Technology Benefits
Noise (cumulative below stage 4)	-32 dB	-42 dB	-71 dB
LTO NO _x Emissions (below CAEP 6)	-60%	-75%	better than -75 %
Performance: Aircraft Fuel Burn	-33%	-50%	better than -70 %

Рис. 1. Долгосрочные цели ACARE (сверху) и NASA (снизу) по снижению негативного воздействия авиационной отрасли на окружающую среду

Для ответа на вызовы, стоящие перед авиационной отраслью, в 2019 году была разработана дорожная карта IATA Technology Roadmap to 2050 [5].

Согласно консенсус-прогнозу ведущих экспертов, достижение целевых показателей совершенства 2050 года невозможно в рамках традиционной на сегодняшний день архитектуры пассажирских самолетов «Tube&Wing». Архитектура «Tube&Wing» подразумевает сигаро-образный фюзеляж и стреловидное крыло с двумя двухконтурными турбореактивными двигателями, установленными под крылом. В рамках логики IATA Technology Roadmap 2050 [5] предусмотрен поиск новых архитектур летательных аппаратов, а также новых архитектур силовых установок, рисунок 2.

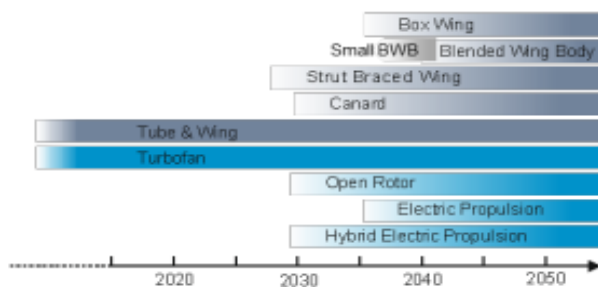


Рис. 2. Дорожная карта развития и номенклатура рассматриваемых IATA критических технологий

Среди новых архитектур силовых установок выделяются турбовинтовентиляторные двигатели, а также гибридные и полностью электрические силовые установки.

В последние годы инициирован ряд масштабных исследовательских программ, направленных на создание гибридных силовых установок (ГСУ) для турбовинтового регионального самолета, например IMOTHEP, FUTPRINT50, ASuMED, HE-ART, AMBER, Project 804 и др.

Доминирующей архитектурой силовой установки для регионального турбовинтового самолета пассажироместимостью 30-50 человек является ГСУ параллельной схемы [6, 8-10], однако рассматриваются также ГСУ последовательно-параллельной схемы [7], а также ГСУ последовательной схемы с распределенной архитектурой [11].

ОБЛИК ТУРБОВИНТОВОГО РЕГИОНАЛЬНОГО САМОЛЕТА

В апреле 2019 года компании Pratt&Whitney Canada и Collins Aerospace (входят в корпорацию Raytheon Technologies Corporation) анонсировали запуск совместной инновационной программы Project 804, направленной на разработку демонстратора регионального пассажирского самолета с гибридной силовой установкой. В рамках проекта Project 804 планируется ремоторизация регионального турбовинтового самолета De Havilland Dash 8-100 (рисунок 3, 4) с целью повышения топливной эффективности и снижения негативного воздействия на окружающую среду. В рамках программы Project 804 предполагается замена одного из турбовинтовых двигателей Pratt&Whitney Canada PW121 на ГСУ мощностью 2МВт параллельной схемы [9].

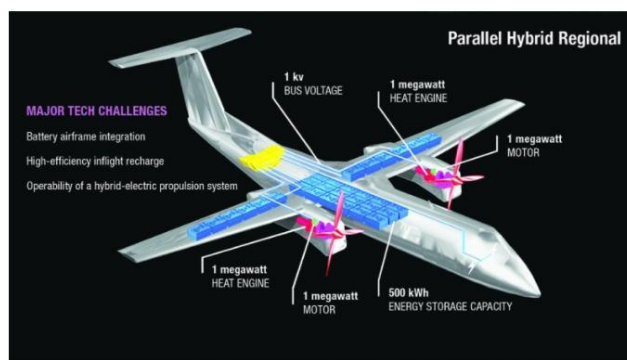


Рис. 3. Компоновка гибридной силовой установки на самолете

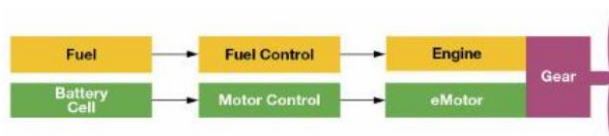


Рис. 4. Архитектура ГСУ параллельной схемы

Согласно концепции Project 804, при осуществлении установившегося крейсерского полета самолета вся необходимая мощность на привод воздушного винта генерируется турбовинтовым двигателем. При взлете и наборе высоты необходимая мощность на привод воздушного винта передается как от турбовинтового двигателя, так и от электродвигателя, при наборе высоты доля мощности, вырабатываемой электрической машиной плавно снижается до 0%.

Планируется, что аккумуляторная батарея, система распределения энергии и все электрические системы гибридной силовой установки будут размещены в салоне самолета, а турбовальный двигатель и электродвигатель, а также редуктор воздушного винта будут размещены в модифицированной мотогондоле самолета

В работе [9] описан типовой полетный цикл De Havilland Dash 8-100, таблица 1.

Типовой полетный цикл De Havilland Dash 8-100

Этап полетного цикла	Продол-ть, с	Потр. мощ-ть, л.с.	Прибор. ск-ть полета, узлов	Высота в конце этапа, м
Руление	120	100		0
Взлет (Take-off)	60	1950	115	400
Набор высоты (Initial climb to 5000 ft)	63	1575–1150	150	1524
Набор высоты (Climb to FL150)	400		210	4572
Набор высоты (Climb to FL240)	450		210	7315
Крейс. полет (Cruise)	1980	960	360*	7625
Снижение (Descent to FL100)	560	100	270	3048
Снижение (Approach)	348		245	400
Посадка (Landing)	120	630	121	0
Руление	120	100		0

Важно подчеркнуть, что в работе [9] рассмотрен типовой полетный цикл дальностью 463км, а максимальная дальность полета De Havilland Dash 8-100 составляет 1900км.

В соответствии с актуальными тенденциями при разработке гибридной силовой установки предполагается, что рулежка самолета по ВПП осуществляется при выключенном ГТД от аккумуляторной батареи.

Штатно на De Havilland Dash 8-100 устанавливается Pratt&Whitney Canada PW121 – трехвальный турбовинтовой двигатель. Семейство Pratt&Whitney Canada PW 1XX начало создаваться в начале 1980-х годов, в настоящее время трехвальная схема турбовинтовых двигателей не находит широкого применения. С развитием методов вычислительной газодинамики доминирующей архитектурой в данном классе мощности стала двухвальная схема с одноступенчатым высоконагруженным центробежным компрессором.

Авторами проведен комплекс параметрических исследований для двухвального турбовинтового двигателя в составе ГСУ параллельной схемы

при различной степени гибридизации и программе управления по типовой траектории полета.

РЕЗУЛЬТАТЫ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ ИССЛЕДОВАНИЙ

Результаты расчета референсной модели двухвального турбовинтового двигателя для De Havilland Dash 8-100 представлены на рис. 5.

Station	W kg/s	T K	P kPa	WRstd kg/s			
amb		288,15	101,325		FN =	27,97 kN	
1	5,698	288,15	101,325		TSFC =	4,5869 g/(kN*s)	
2	5,698	288,15	99,299	5,814	V0 =	0,00 m/s	
3	5,698	601,01	905,404	0,921	FN res =	1,48 kN	
31	5,185	601,01	905,404		WF =	0,12829 kg/s	
4	5,313	1461,98	859,943	1,410	Therm Eff=	0,25925	
41	5,621	1419,26	859,943	1,470	P2/P1 =	0,98000	
43	5,621	1153,72	309,265		TRQ =	203,1 %	
44	5,826	1135,83	309,265		P45/P44 =	0,97990	
45	5,826	1135,83	303,050	3,868	Incidence=	0,00000 °	
49	5,826	924,24	116,381		P6/P5 =	0,98499	
5	5,826	924,24	116,381	9,084	P8/Pamb =	1,13135	
6	5,826	924,24	114,634		wBld/w2 =	0,00000	
8	5,826	924,24	114,634	9,223	A8 =	0,05825 m²	
Bleed	0,000	288,15	99,299		wCHN/w2 =	0,05400	
					wCHR/w2 =	0,03600	
					Loading =	40,72 %	
					wCLN/w2 =	0,00000	
					wCLR/w2 =	0,00000	
Efficiencies:					eta t-s =	0,80016	
Compressor		isentr 0,7952	polytr 0,8465	RNI 0,980	P/P 9,118	PwX =	0,00 kW
Burner		0,9959			0,950	PwSD =	1434,30 kW
HP Turbine		0,8830	0,8698	1,315	2,781	PwSD,eq =	1600,31 kW
LP Turbine		0,9012	0,8902	0,599	2,604	SFC,eq =	0,28860 kg/(kW*h)
HP Spool mech Eff		0,9900		Speed 32307 rpm		PSFC =	0,32200 kg/(kW*h)
PT Spool mech Eff		0,9800		Speed 20000 rpm			
hum [%]		war0	FHV	Fuel			
0,0		0,00000	43,124	Generic			

Рис. 5. Результаты термогазодинамического расчета референсной модели двигателя на взлетном режиме

При концептуальном проектировании ГТД в составе гибридной силовой установки следует учитывать не только повышение топливной эффективности при увеличении степени гибридизации, но и ухудшение массово-габаритных характеристик ГСУ, так как на ее эффективность в составе летательного аппарата оба этих фактора влияют противоположно. С ростом степени гибридизации удельный расход топлива $C_{уд}$ ГТД снижается, но при этом растет масса электрических компонентов ГСУ, поэтому при оценке эффективности двигателя в системе летательного аппарата одновременно учитывается снижение расхода топлива и повышение массы гибридной силовой установки $M_{ГСУ}$. Для этого принимается такой критерий, как суммарная масса ГСУ и топлива, который включает массу теплового и электрического двигателей, массу аккумуляторной батареи и массу топлива, необходимого для полета по

типовому полетному циклу. Масса ГТД оценивается согласно методике, изложенной в [12].

Кроме того, ведется оценка стоимости тонно-километра для рассматриваемого летательного аппарата при различной архитектуре ГСУ согласно [12].

При концептуальном проектировании ГСУ параметрический анализ проводится на режиме крейсерского полета, как наиболее важном для гражданского пассажирского самолета. Параметрический анализ заключается в варьировании степени повышения давления π_k от 9 до 12 (так как предполагается, что на двигателе будет установлен одноступенчатый центробежный компрессор) и температуры газа за камерой сгорания T_g^* от 1300К до 1450К соответственно, а также степени гибридизации на взлете, наборе высоты и крейсерском участке типового полетного цикла. При изменении степени гибридизации изменяется необходимая мощность ГТД на отдельных участках типового полетного цикла. При изменении температуры газа за камерой сгорания проводится коррекция параметров вторичной воздушной системы согласно [12].

Для расчета массы электрических компонентов для каждой степени гибридизации производятся расчеты:

– массы электромотора $M_{ЭМ}$

$$M_{ЭМ} = \frac{N_{ЭМ}}{\eta_{ЭМ}} \cdot n \cdot N_{уд\ ЭМ},$$

где $N_{ЭМ}$ – мощность электромотора, кВт; $\eta_{ЭМ}$ – КПД электромотора; n – количество электромоторов; $N_{уд}$ – удельная мощность электромотора, кВт/кг.

– массы блока управления $M_{БУ}$

$$M_{БУ} = \frac{N_{БУ}}{\eta_{БУ}} \cdot n \cdot N_{уд\ БУ},$$

где $N_{БУ}$ – мощность блока управления, кВт; $\eta_{БУ}$ – КПД блока управления; n – количество блоков; $N_{уд\ БУ}$ – удельная мощность блока управления, кВт/кг.

– массы линии подачи питания $M_{ЛП}$

$$M_{\text{ЛП}} = \frac{N_{\text{ЛП}}}{\eta_{\text{ЛП}}} \cdot n \cdot N_{\text{уд, ЛП}},$$

где $N_{\text{ЛП}}$ – мощность линии подачи питания, кВт; $\eta_{\text{ЛП}}$ – КПД линии подачи питания; n – количество линий; $N_{\text{уд, ЛП}}$ – удельная мощность линии подачи питания, кВт/кг.

– массы аккумуляторной батареи $M_{\text{акб}}$

$$M_{\text{акб}} = \frac{n \cdot k \cdot C_{\text{уд}} \cdot X}{\eta_{\text{ЛП}} \cdot \eta_{\text{БУ}} \cdot \eta_{\text{ЭМ}} \cdot \eta_{\text{акб}}},$$

где n – количество тепловых двигателей; $k = 1,5$ – коэффициент запаса емкости аккумуляторной батареи; $C_{\text{уд}}$ – удельная емкость аккумуляторной батареи, Втч/кг; X – потребная емкость аккумулятора

$$X = N_{\text{эл}} t,$$

где $N_{\text{эл}}$ – средняя располагаемая мощность электромотора на этапе полета; $\eta_{\text{акб}}$ – КПД аккумуляторной батареи; t – продолжительность этапа полета.

Современные удельные параметры электрических компонентов имеют следующие значения [6, 9], рисунок 6.

	Power to Weight (kW/kg)	Performance	Notes
Motor	13	0.97 eff	NASA support motor development
Motor Drive	20	0.98 eff	NASA supported inverter dev
Feeders	100	0.99 eff	Estimate
Battery	355 Whr/kg packaged	500 Whr/kg cell, 0.95 eff, 90% max discharge, 15% back burden	Parameter targets laid out by Battery 500 consortium
TMS	2	NA	0.5 kg for every 1 kW of EDT heat rejection (2 kW/kg)

Рис. 6. Эффективность и удельная масса электрических компонентов ГСУ [9]

В таблицах 2 и 3 показан пример параметрического анализа ГТД в составе ГСУ параллельной схемы при постоянной степени гибридации 30% во время взлета и набора высоты.

Таблица 2

Параметрический анализ ГТД в составе ГСУ параллельной схемы при постоянной степени гибридации 30%

T_{Γ}^*	π_{κ}	$M_{дв}, \text{ кг}$	$m_{\tau}, \text{ кг}$	$M_{\text{СУ}}, \text{ кг}$	$M_{\text{ГСУ}}, \text{ кг}$	$M_{\text{ГСУ}+\tau}, \text{ кг}$	$C_{\text{ТКМ}}$
1300	9	343,8	204,4	1168,8	2213,7	2587,3	0,197
	10	348,0	198,2	1183,2	2226,8	2588,6	0,191
	11	353,7	193,3	1202,6	2244,1	2596,4	0,186
	12	360,5	189,4	1225,6	2264,9	2609,9	0,182
1350	9	310,6	185,5	1056,1	2156,3	2527,4	0,195
	10	313,6	179,5	1066,1	2166,3	2525,4	0,189
	11	317,7	175,7	1080,2	2180,4	2531,9	0,185
	12	322,5	171,3	1096,4	2196,6	2539,3	0,181
1400	9	298,5	185,2	1015,0	2115,2	2485,5	0,195
	10	300,9	179,1	1022,9	2123,1	2481,3	0,189
	11	317,7	175,7	1080,2	2134,9	2483,5	0,184
	12	308,7	170,3	1049,5	2149,7	2490,4	0,179
1450	9	288,3	184,9	980,3	2080,5	2450,3	0,195
	10	290,1	178,6	986,5	2086,7	2443,9	0,188
	11	293,0	173,7	996,4	2096,6	2444,0	0,183
	12	296,8	170,1	1009,1	2109,3	2449,5	0,179

Таблица 3

Масса электрических компонентов в составе ГСУ параллельной схемы при постоянной степени гибридации 30%

	Мощность, кВт (Емкость, кВтч)	Кол-во	Удельная мощность, кВт/кг (Удельная емкость, Втч/кг)	Масса компонента, кг
Аккумуляторная батарея	305,07	1	355	859,37
Электродвигатель	443,58	2	13	68,24
Блок управления	439,05	2	20	43,91
Линии подачи питания	434,62	2	100	8,69
Редуктор	–	–	–	45
Система управления тепловым состоянием	–	–	–	75

Авторами проведен комплекс подобных параметрических исследований при различной степени гибридации во время взлета (0%, 10%, 30%, 50%,

70%), набора высоты (постоянная/плавно снижающаяся), крейсерского полета (0%, 10%, 15%, 20%).

В таблице 4 представлены результаты сравнительного анализа обликов ГСУ при различных степенях гибридизации и различных параметрах цикла. Проведенный анализ показал, что применение гибридизации во время снижения и посадки не целесообразно.

Каждая модель маркирована в таблице 4 обозначением типа AA-BB-CC-DD-EE, где: AA обозначает степень гибридизации во время взлета; BB, CC и DD обозначает степень гибридизации во время трех фаз набора высоты (описаны в таблице 1); EE обозначает степень гибридизации во время крейсерского полета.

Таблица 4

Сравнительный анализ обликов ГСУ при различной степени гибридизации

Схема	ΔM_{PW} , кг	$\Delta C_{ТКМ}$, %	$\Delta M_{0\%}$, кг	$\Delta C_{ТКМ 0\%}$, %	L_{Pmax}	$N_{пас}$
1	2	3	4	5	6	7
PW121					2014,5	
0%	316,7	6,6			2716,9	
	267,7	13,0			2785,0	
10-10-10-10-0%	7,1	14,9	323,8	8,86	2201,0	0,1
	33,8	21,1	350,5	15,56	2279,4	0,3
30-30-30-30-0%	512,6	22,2	829,3	16,72	1347,1	5
	374,8	29,2	691,5	24,15	1684,1	4
50-50-50-50-0%	1062	27,4	1378,8	22,32	399,6	10
	925,3	34,2	1242,0	29,53	650,7	9
70-70-70-70-0%	2768	32,6	3085,0	27,80	-2542,4	26
	2543	36,0	2859,7	31,48	-2386,0	24
30-30-20-10-0%	207,0	18,4	523,7	12,66	1874,0	2
	73,4	25,3	390,1	20,01	2249,9	1
30-30-30-30-10%	736,6	27,8	1053,3	22,69	643,0	7
	616,2	34,2	932,9	29,55	729,7	6
30-30-20-20-20%	745,6	29,9	1062,3	24,97	576,3	7
	639,7	36,1	956,4	31,59	623,0	6
30-30-20-15-15%	576,9	26,9	893,6	21,71	683,0	5
	463,1	33,4	779,8	28,65	749,7	4
30-30-20-10-10%	436,7	20,2	753,4	14,59	843,0	4
	312,9	29,9	629,6	25,00	1003,0	3

Окончание табл. 4

1	2	3	4	5	6	7
50-40-30- 20-0%	530,0	21,7	846,7	16,12	777,8	5
	391,9	28,7	708,6	23,65	1629,8	4
50-40-30- 20-10%	757,1	26,8	1073,8	21,63	656,3	7
	636,0	33,4	952,7	28,65	763,0	6

В таблице 4 ΔM_{PW} – увеличение массы ГСУ и топлива потребного на типовой полетный цикл по сравнению с базовым двигателем Pratt&Whitney Canada PW121, $\Delta C_{ТКМ},\%$ - это относительное изменение стоимости тонно-километра при полете по типовому полетному циклу по сравнению с Pratt&Whitney Canada PW121, $\Delta M_{0\%}$ - увеличение массы ГСУ и топлива потребного на типовой полетный цикл по сравнению с референсным двухвальным двигателем, $\Delta C_{ТКМ 0\%},\%$ - это относительное изменение стоимости тонно-километра при полете по типовому полетному циклу по сравнению с референсным двухвальным двигателем, $L_{Пmax}$ – это максимальная дальность полета De Havilland Dash 8-100 при использовании рассматриваемой ГСУ, а $N_{пас}$ – это возможное уменьшение пассажироместности De Havilland Dash 8-100 за счет увеличения массы ГСУ.

Полученные результаты демонстрируют, что реализация степени гибридизации 10% нецелесообразна с точки зрения влияния на топливную эффективность, а степень гибридизации 70% нецелесообразна с точки зрения массо-габаритных характеристик ГСУ.

Как можно видеть в таблице 4, максимальное сокращение стоимости тонно-километра достигает 33.4% по сравнению с Pratt&Whitney PW121 и 28.65% по сравнению с референсным двухвальным двигателем.

Авторами рассмотрены два базовых алгоритма управления ГСУ по типовому полетному циклу - 30-30-20-10-0% (гибридизация 30% во время взлета и плавное снижение 30-10% во время набора высоты) и 50-40-30-20-0%. Для базовых сценариев снижение стоимости тонно-километра по сравнению с Pratt&Whitney PW121 и референсным двигателем для схемы 30-30-20-10-0%

составляет 25.3 и 20.1%, а для схемы 50-40-30-20-0% составляет 28.7 и 23.65% соответственно.

Как можно видеть в таблице 1, в рамках рассматриваемого типового полетного цикла дальностью 463км длительность взлета составляет 60с, набора высоты 913с, а крейсерского участка 1980с. Фактически определяющим фактором при формировании облика ГСУ становится степень гибридизации во время набора высоты и крейсерского полета.

В рамках рассматриваемого типового полетного цикла целесообразно рассмотреть возможность гибридизации силовой установки во время крейсерского полета, для чего рассмотрены модели 30-30-20-10-10%, 30-30-20-15-15%, 30-30-20-20-20%, 50-40-30-20-10%. Как можно видеть в таблице 4, максимальная топливная эффективность самолета при полете по типовому полетному циклу дальностью 463км достигается при гибридизации силовой установки во время крейсерского полета. Полученные результаты хорошо согласуются с данными в работе [7].

Для каждой схемы гибридизации в таблице 4 показано по две модели – консервативная (параметры на крейсерском режиме $\pi_k = 9, T_g^* = 1300$) и оптимистичная (параметры на крейсерском режиме $\pi_k = 12, T_g^* = 1450$). Как можно видеть, за счет выбора оптимальной степени гибридизации и алгоритма управления ГСУ по типовому полетному циклу можно добиться как максимальной топливной эффективности ($\Delta C_{ТКМ}$ 33.4% и 28.65%) при повышенных параметрах цикла, так и повышенной топливной эффективности ($\Delta C_{ТКМ}$ 26.9% и 21.71%) при умеренных параметрах цикла.

В таблице 4 показана максимальная дальность полета De Havilland Dash 8-100 при различных конфигурациях ГСУ.

На основе данных FlightRadar получена статистика по дальности рейсов De Havilland Dash 8-100 в России, Канаде и Соединенных Штатах Америки в 2022 году, рисунок 7.

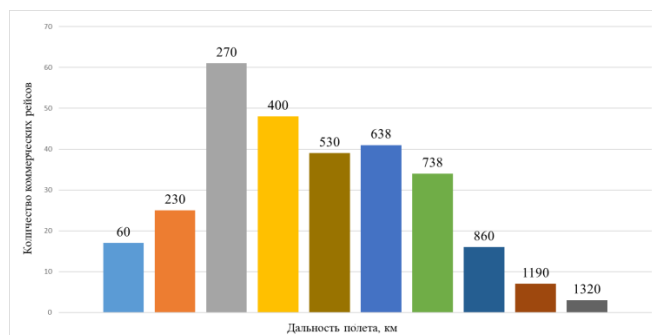


Рис. 7. Статистика по дальности полета De Havilland Dash 8-100 в России, Канаде и Соединенных Штатах Америки в 2022 году

Как можно видеть на рис. 7, максимальная практическая дальность полета De Havilland Dash 8-100 составляет 1320км, однако, полеты дальностью более 738 км имеют низкую долю и совершаются преимущественно в отдаленных районах Сибири и Канады. Порядка 90% всех полетов De Havilland Dash 8-100 имеет дальность не превышающую 738км.

Как можно видеть в таблице 7, для ряда архитектур максимальная дальность полета составляет менее 738км - 50-50-50-50-0%, 30-30-30-30-10%, 30-30-20-20-20%, 30-30-20-15-15%, 50-40-30-20-10%. Наиболее привлекательными с точки зрения топливной эффективности самолета являются схемы гибридизации 30-30-20-15-15%, 30-30-20-10-10% и 50-40-30-20-10%.

Одним из альтернативных подходов к оценке облика ГСУ является расчет изменения пассажироместимости из-за повышения массы ГСУ при сохранении массы самолета. С точки зрения результирующей массы ГСУ наиболее привлекательной схемой гибридизации является 30-30-20-10-0%.

Отдельного внимания заслуживает выбор консервативного уровня параметров ГТД при высоком уровне гибридизации.

В качестве заключения следует отметить, что рациональный выбор облика ГСУ для турбовинтового регионального самолета требует проведения комплексного анализа функционирования летательного аппарата, а также технико-экономического обоснования.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Aerospace & Defense. 2011 Year in Review and 2012 Forecast. Issue 2, February, 2012. PricewaterhouseCoopers LLP.
2. The Sustainability of UK Aviation: Trends in the Mitigation of Noise and Emissions. Indep. Trans. Comm. March 2016.
3. Madden P. CAEP Combustion Technology. Review Process and CAEP NOx Goals. 2 July 2014. Rolls-Royce. 2014.
4. ACARE: Flightpath 2050 – Europe’s Vision for Aviation, Luxembourg, 2011.
5. IATA Technology Roadmap to 2050, 2019.
6. Sahoo, S.; Zhao, X.; Kyprianidis, K. A Review of Concepts, Benefits, and Challenges for Future Electrical Propulsion-Based Aircraft. *Aerospace* 2020, 7, 44. <https://doi.org/10.3390/aerospace7040044>
7. Hybridization and Mission Analysis of a Regional Turboprop F. Orefice1, F. Nicolosi, S. Corcione, P. Della Vecchia, D. Ciliberti, M. Ruocco AIAA AVIATION 2021 FORUM.
8. Voskuijl, M., van Bogaert, J. & Rao, A.G. Analysis and design of hybrid electric regional turboprop aircraft. *CEAS Aeronaut J* 9, 15–25 (2018). <https://doi.org/10.1007/s13272-017-0272-1>.
9. T. Spierling and C. Lents, "Parallel Hybrid Propulsion System for a Regional Turboprop: Conceptual Design and Benefits Analysis," 2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2019, pp. 1-7, doi: 10.2514/6.2019-4466.
10. F. Orefice, F. Nicolosi, S. Corcione, P. Della Vecchia, D. Ciliberti, M. Ruocco "Hybridization and Mission Analysis of a Regional Turboprop" AIAA Aviation 2021 Forum <https://doi.org/10.2514/6.2021-2421>
11. de Vries, R. (2022). Hybrid-Electric Aircraft with Over-the-Wing Distributed Propulsion: Aerodynamic Performance and Conceptual Design. <https://doi.org/10.4233/uuid:ef87dc11-e7b2-4726-a41f-28588d64c58d>
12. Малоразмерные авиационные газотурбинные двигатели: учебное пособие / В.А. Григорьев, В.С. Кузьмичев, В.А. Зрелов и др.; под общей редакцией В.А. Григорьева и А.И. Ланшина. – 2-е изд., доп. – Самара: Издательство Самарского университета, 2022. – 452 с.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПОГРУЖНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ¹

Аннотация: В статье проведен анализ основных факторов, влияющих на надежность погружных электрических двигателей, проведен анализ их повреждаемости; выбраны основные свойства надежности погружных электрических двигателей и количественные показатели для их оценки; проведен расчет надежности; проведен анализ обмоточных проводов, применяемых в погружных электрических двигателях, и даны рекомендации по повышению надежности погружных электрических двигателей.

Ключевые слова: погружной электрический двигатель, надежность, расчет надежности.

ВВЕДЕНИЕ

В погружных электроустановках, таких как нефтяные и водяные насосы, электробуры, специальные погружные устройства широко применяются погружные электрические двигатели (ПЭД). ПЭД имеют различные конструкции (асинхронные, постоянного тока, вентильные) и выпускаются такими отечественными производителями, как: «АЛНАС РИМЕРА», «НОВОМЕТ», «Альянс Агрегат Сервис» и др. Ресурс ПЭД от начала эксплуатации до капитального ремонта в среднем составляет два года, а после ремонта примерно половину ресурса нового двигателя. Например, статистика отказов для вентильных ПЭД следующая: упорный подшипник – 30%; обмотка статора – 30%; износые отказы узлов – 20%; прочие отказы – 20%. В современных условиях ограничения финансирования, износ ПЭД достигает 70%. Несмотря на сложность процессов разрушения элементов и узлов ПЭД, определяемых воздействием на разнородные материалы (конструкционные, проводниковые, изоляционные и магнитные) комплекса электромагнитных, тепловых и механических нагрузок, а также влажных сред с агрессивными химическими и механическими компонентами, оценка безотказности, сохраняемости и ремонтпригодности позволит ориентировать проектировщиков, изготовителей и эксплуатационников на комплексное решение задач обеспечения требуемого уровня надежности ПЭД.

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

Наибольший интерес с точки зрения авторов представляет надежность асинхронных ПЭД, при этом: проведен анализ основных факторов, влияющих на надежность; проведен анализ повреждаемости двигателей; выбраны основные свойства надежности ПЭД и количественные показатели для их оценки; проведен расчет надежности; проведен анализ обмоточных проводов ПЭД и даны рекомендации по повышению надежности ПЭД.

АНАЛИЗ ФАКТОРОВ, ВЛИЯЮЩИХ НА НАДЕЖНОСТЬ ПЭД

Основные факторы, влияющие на надежность ПЭД: условия окружающей среды (изоляционная конструкция обмоток непосредственно подвергается воздействию перекачиваемой жидкости и возникает коррозия элементов ПЭД, например коррозия корпуса и нарушение герметизации); низкий уровень эксплуатационного обслуживания: некачественные монтаж и ремонт; невозможность адаптации к параметрам промысла и глубокого регулирования, (например, наличие различных примесей в пластовой жидкости, приводит к засорению насоса и, как следствие, перегрузке ПЭД); снижение жесткости конструкции из-за ее протяженности (до 18 м) при малом поперечном сечении (до 127 мм); недостаточно совершенная система охлаждения корпуса ПЭД, что приводит к перегреву и разрушению изоляции обмоток статора; пробой изоляции обмотки статора; механические перегрузки в момент пуска; неправильный подбор параметров ПЭД и насоса и др. Диаграмма повреждаемости основных типоразмеров ПЭД приведена на рис. 1. Анализ повреждаемости ПЭД [1] представлен на рис. 2.

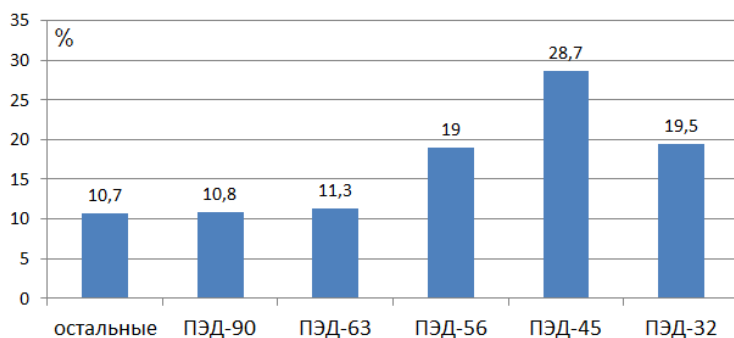


Рис. 1. Диаграмма повреждаемости основных типоразмеров ПЭД

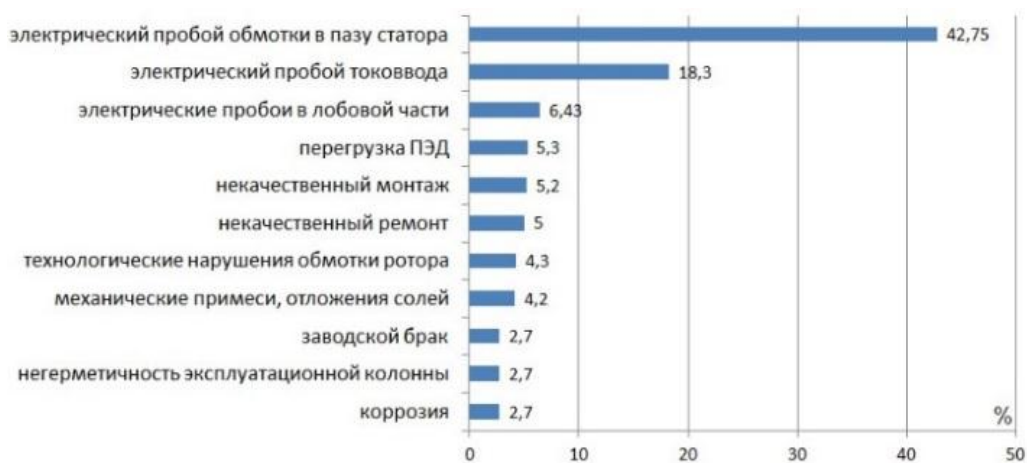


Рис. 2. Диаграмма повреждаемости ПЭД

По рис. 2. видно, что основные повреждения ПЭД это:

- электрический пробой обмотки в пазу статора – 42,75 %, чаще всего обусловлен тем, что при недопустимых перегрузках изоляция подвергается перегреву выше предельных температур, допустимых классом изоляции;
- электрические пробои в лобовой части – 6,43 %, возникают в результате: механических повреждений изоляции при намотке (формовке лобовых частей) или сборке двигателей; механических включений в самой изоляции, приводящих со временем к ее пробую (заводской брак и/или применение некачественных материалов);
- электрический пробой токоввода – 18,3%;
- технологические нарушения, связанные с «размыванием» короткозамыкающих колец алюминиевой обмотки ротора – 4,3 %;
- коррозия – 2,7%, заключающаяся в разрушении пакетов статора, ротора и крепежа и т.д.;
- некачественный ремонт – 5%; некачественный монтаж – 5,2%.

ОЦЕНКА НАДЕЖНОСТИ ПЭД

Оценка надежности проводится на основе теории вероятности. Распространение получили эмпирические характеристики «межремонтный период» (*mean time between failure*) и «наработка на отказ за текущий год», которые затрудняют корректное сравнение полученных результатов и имеют

недостатки: не являются вероятностными, что противоречит природе характеризуемого процесса; искусственно ограничивают объем данных, подлежащих анализу, рамками одного года; имеют недостаточную точность измерения надежности.

В [2] предложена методика, в которой кроме ВБР и вероятности восстановления (показатель ремонтпригодности), использован показатель $T\gamma$ – гарантированный ресурс или время, которое безотказно проработает часть двигателей равная γ . Например, $T_{0,5}$ – время, за которое безотказно проработает 50% оборудования. Также использовали $P(t_0)$ или долю оборудования, которое безотказно проработает время t_0 , например 1000 суток. Эти величины легко определяются из графиков, приведенных на рис. 3. На рисунке 4 приведена зависимость вероятности восстановления $P_v(t)$ от времени для ПЭД производства Новомет и сравнение их с импортным оборудованием.

Авторы [2] также разработали программное обеспечение (ПО) NeoStat-Pro для выполнения расчетов, в котором общие подходы математической теории надежности, основанные на множительных алгоритмах вычисления надежности (Каплана-Мейера, Герда, таблиц жизни) были адаптированы к данной методике.

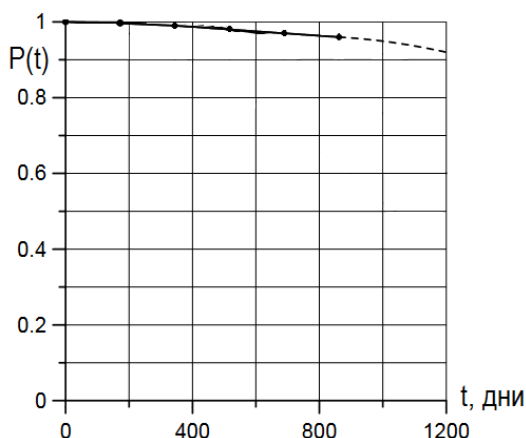


Рис. 3. Зависимость ВБР от времени эксплуатации ПЭД

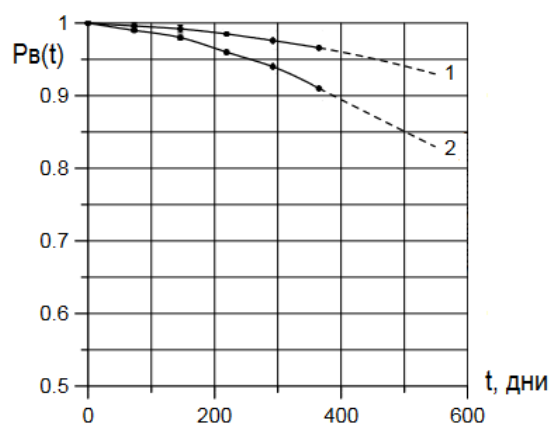


Рис. 4. Вероятность восстановления ПЭД:
 1 – оборудование Новомет, 2 – импортное оборудование

Недостатком методики [2] можно считать сложность вычислений и необходимость применения специального ПО. Достоинство методики, в том, что исходные данные о наработке включают всю имеющуюся информацию о работе ПЭД. При расчете межремонтного периода и наработки на отказ, недопустимо учитывать только работу в течение текущего года, так как, не рассматривая ранее произошедшие отказы, нельзя вычислить не надежные конструкции и искусственно завышается надежность оцениваемого оборудования.

Авторами предложена методика расчета надежности ПЭД [3]. Свойством надежности, оцениваемом при расчете надежности ПЭД, выбрана безотказность. Количественные показатели безотказности: вероятность безотказной работы (ВБР) $P(t)$, вероятность отказа $Q(t)$, частота отказов $a(t)$, интенсивность отказов $\lambda(t)$, средняя наработка до первого отказа $T_{ср}$. Исследованию подвергались 100 асинхронных ПЭД (ПЭДВ и МАПЗ) с короткозамкнутым ротором. ПЭД МАПЗ предназначены для работы в воде температурой не выше 20°C , не содержащей химически агрессивных веществ и механических примесей. Охлаждение подшипников и обмотки статора осуществляется водой, находящейся во внутренней полости ПЭД. ПЭДВ более совершенны, чем двигатели МАПЗ. ПЭДВ предназначены для работы в неагрессивной среде (жидкости) с температурой до 25°C и содержанием

механических примесей не более 0,01% (по массе), герметизированы для предохранения внутренней полости от попадания механических примесей.

Для оценки надежности ПЭД выбран логарифмически нормальный закон распределения случайных величин (отказов), тогда интенсивность отказов и ВБР определяются соотношениями [3]:

$$\lambda(t) = \frac{\frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \exp\left(-\frac{(\ln t - \mu)^2}{2\sigma^2}\right)}{\Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)} \quad (1)$$

$$P(t) = \left[1 - \Phi\left(\frac{\ln t - \mu}{\sigma}\right)\right] \quad (2)$$

где σ – среднеквадратическое отклонение логарифма времени наработки $\sigma=0,3445-0,4167$; μ – математическое ожидание натурального логарифма случайной величины t , обозначающей наработку на отказ; t – время за которое определяется надежность; $\ln t=3,2705-3,5058$, центрированная и нормированная функция вида $\Phi(z)$ (замена переменных $z=(\ln t - \mu)/\sigma$) определяется из таблиц [4].

Была проведена проверка гипотезы о логарифмически нормальном распределении по критерию Пирсона [3]

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^r \frac{(m_i - np_i)^2}{np_i}$$

где p_i – вероятность попадания статистической величины в интервал; m_i – число отказов ПЭД, попадающих в i -й интервал или принимающих i -е значение; n – общее количество наблюдаемых ПЭД, r – количество интервалов статистического ряда (групп выборки). В каждом интервале должно быть не менее 5...10 значений.

На рис. 5 приведено сравнение теоретической и эмпирической кривых ВБР по критерию Пирсона.

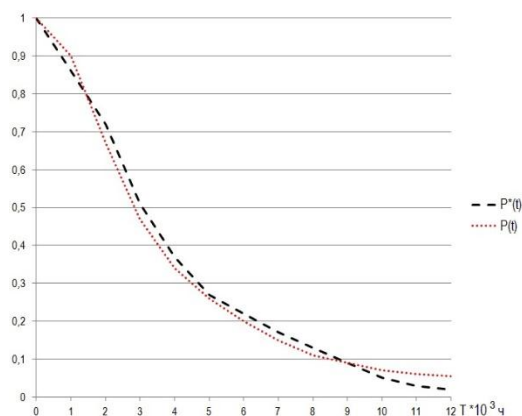


Рис. 5. Сравнение по критерию Пирсона полученных кривых:
 $P(t)$ – теоретическая и $P^*(t)$ – эмпирическая

Полученные значения критерия Пирсона сравнивались с табличными [4] для соответствующей доверительной вероятности Q и числа степеней свободы $k=r-3$. При $Q=0,05$ и $k=3$ рассчитанное значение $\chi^2(0,25)$ меньше табличного 0,3520, поэтому гипотеза об идентичности эмпирического и теоретического законов принята.

В ходе анализа выявлено, что основным фактором, влияющим на повреждаемость ПЭД, являются условия окружающей среды, так как обмотки ПЭД подвергаются воздействию перекачиваемой жидкости. В связи с этим принципиальными особенностями обмоточных проводов ПЭД являются [5]: повышенная электрическая прочность изоляции; химическая стойкость к воздействию масел, нефтепродуктов, щелочей, кислот, спиртов и других агрессивных сред; высокая механическая прочность в связи со значительными растягивающими, истирающими и режущими нагрузками в процессе изготовления статоров; длительная эксплуатация в условиях высоких температур. Конструктивно электрические обмоточные провода представляют собой одно- или многопроволочную токопроводящую жилу с изоляцией. Изоляция может быть выполнена одним из двух способов [5]: обмоткой изоляционными лентами с последующим запеканием слоев полимерных лент или экструзией (выдавливанием изоляционного полимера, нагретого до температуры плавления).

В качестве полимерных материалов изоляции обмоточных электрических проводов для ПЭД используются полиэтилен низкой и высокой плотности, полипропилен, поливинилхлорид, фторопласт, эмаль. Наибольшее распространение получили следующие типы изоляции [6]: двухслойная из полиэтиленовых лент низкой и высокой плотности; двухслойная из двух материалов – полиэтилена и полипропилена; двухслойная из эмали и поливинилхлоридного пластиката; многослойная (до 5 слоев) ленточная из разных типов фторопластовых или полиимидно-фторопластовых пленок; однослойная монолитная изоляция из экструдированного слоя фторопласта; двухслойная из пленки фторопласта одной марки и экструдированного слоя из фторопласта другой марки и др. На практике наибольшее применение при изготовлении статоров ПЭД нефтепогружных электронасосов находят обмоточные электрические провода [7]: марки ППИ-У, выполненные из токопроводящей медной жилы и двух слоев полиимидно-фторопластовой пленки отечественного или импортного производства с последующей термической обработкой; ПЭИ-200, выполненные из токопроводящей медной жилы, первого изоляционного слоя, выполненного методом эмалирования из полиамидимидного лака, и второго слоя из односторонней полиимиднофторопластовой пленки с последующей термообработкой. Недостатком этих проводов являются довольно низкие технические характеристики.

Улучшение технических характеристик обмоточных электрических проводов ПЭД идет в основном по пути использования новых материалов изоляции и усовершенствования технологии их нанесения при этом важным показателем является также и уменьшение цены изделия. Известны обмоточные электрические провода, с улучшенными характеристиками, содержащие токопроводящую жилу: изолированную полиамидно-фторопластовой пленкой; покрытую полимерной изоляцией, выполненной из ароматического полиэфирэфиркетона; с изоляцией из экструдированного радиационно модифицированного фторполимера.

Ароматический полиэфирэфиркетон имеет преимущества при производстве: комплектного оборудования; электроники; изоляции проводов и кабелей; оборудования новых транспортных систем (авиационно-космической и автомобильной промышленности); полупроводников. Во всех этих случаях, использование материалов на основе ароматического полиэфирэфиркетона (*VICTREX*® (полиэфирэфиркетон *PEEK*), *VICOTE*®, пленка *APTIV*, производимая с использованием полимера *VICTREX*®) способствует снижению системных издержек и улучшению эксплуатационных характеристик, при этом показатель теплостойкости, характеризующий максимально допустимую температуру длительной эксплуатации провода, изготовленного с изоляцией из ароматического полиэфирэфиркетона составляет 250°C, а кратковременной эксплуатации – 300°C.

Технология изготовления провода с изоляцией из экструдированного радиационно-модифицированного фторполимера включает облучение изоляции из фторполимера (сополимера тетрафторэтилена с этиленом), в результате которого радиационное модифицирование фторполимера увеличивает прочность изоляции. Эта технология имеет недостатки. При облучении изоляции электронами в присутствии кислорода часть энергии излучения затрачивается на окисление. Скорость деструкции полимера под влиянием кислорода увеличивается, а скорость сшивания уменьшается. Радиационное окисление поверхности и объема полимера существенно ухудшает электрофизические и механические характеристики изоляции, что особенно проявляется при повышении температуры. Температурные коэффициенты диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления изоляции при облучении на воздухе выше, чем при облучении в инертной среде. В этих случаях существенно различаются так же абсолютные значения диэлектрической проницаемости и удельного сопротивления изоляции. Поэтому целесообразно проводить такое облучение в инертной среде. Однако, в камерах, где производится обработка изоляции электронным облучением, создание бескислородной среды в объеме камеры более 18 м³ с большим

количеством технологических проемов требует серьезных технических решений и капиталовложений.

Известна конструкция обмоточных проводов с улучшенными техническими характеристиками [5], которые позволяют выдерживать более высокие механические и температурные нагрузки, сохраняя при этом все другие улучшенные характеристики, свойственные аналогам, при этом электрический провод, содержит: токопроводящую жилу, с изоляцией из радиационно-модифицированного фторполимера; второй слой изоляции из подвергнутого воздействию направленного пучка электронов полиэфирэфиркетона; соотношение толщины первого слоя изоляции провода к толщине второго слоя, равное 1-1.

В работе [8] приведены результаты исследований основных диэлектрических характеристик изоляции обмоточных проводов в различной среде, в которой работают ПЭД. Рассматривается влияние параметров воды на коррозию ПЭД. Для выявления качественных и количественных закономерностей по влиянию рабочей среды на характеристики ПЭД проведена оценка сопротивления и электрической прочности проводов ПЭД, поступающих в ремонт после различных сроков службы. Для оценки новых обмоточных проводов ПЭД, выпускаемых отечественными производителями авторами [8] были проведены исследования проводов при нормальной рабочей температуре ($20 \div 70^\circ\text{C}$) в различной по составу воде, в лабораторных условиях. При этом нужно было установить изменение основных диэлектрических характеристик изоляции обмоточных проводов и изменение скорости коррозии в следующем составе воды: обычная скважинная вода; дистиллированная вода; скважинная вода с концентрацией рекомендуемых ингибиторов; дистиллированная вода с концентрацией рекомендуемых ингибиторов.

В результате опытов установлено следующее оптимальное содержание ингибиторов: нитрат натрия NaNO_3 ; хромат калия K_2CrO_4 ; уротропин $\text{C}_6\text{H}_{12}\text{N}_4$, при прибавке к дистиллированной воде принятого состава ингибитора коррозия элементов ПЭД почти полностью предотвращается.

Испытательные образцы помещались в четыре бака и выдерживались в них в течение 90÷100 суток при постоянной температуре $70\pm 2^\circ\text{C}$ и при указанном составе воды (среда), при этом температура воды в баках поддерживалась постоянной. В период нахождения образцов в испытательных баках производились измерения пробивного напряжения и сопротивления изоляции. Изменение сопротивления изоляционной конструкции по времени имеет гиперболический характер, а зависимость пробивного напряжения корпусной изоляции – от времени и выражается соотношением

$$U_{np} = A - n \cdot \lg \tau,$$

где U_{np} – пробивное напряжение корпусной изоляции [кВ]; τ – время; A и n – постоянные для определенного вида изоляции. Зависимость межвиткового сопротивления изоляции от времени имеет вид $R_{из} = a \cdot \tau^b$, где $R_{из}$ – межвитковое сопротивление изоляции [МОм]; τ – время; a и b – постоянные коэффициенты для определенного вида изоляции.

Математическая обработка эмпирических данных сводится к определению постоянных коэффициентов. В результате этого построены зависимости $U_{np}(t)$ и $R_{из}(t)$ для каждого исследуемого обмоточного провода по каждому составу воды, для примера на рис. 6 и 7 приведены зависимости обмоточного провода марки ПЭВВП, применяемого для ПЭДВ-32-219 и МАПЗМ-21,9-64/2. Анализ указанных зависимостей показывает, что самое высокое значение диэлектрических характеристик изоляции у обмоточных проводов, находящихся в ингибиторной дистиллированной воде; самое низкое – у обмоточных проводов, находящихся в ингибиторной скважинной воде. Таким образом, по воздействию на изоляцию обмоточных проводов и по уменьшению коррозии элементов ПЭД наиболее благоприятной, охлаждающей средой в ПЭД следует признать дистиллированную ингибированную воду.

Ингибирование обычной скважинной воды не уменьшает, а повышает ее агрессивность по отношению к обмоточному проводу. Обычная скважинная вода, которая в настоящее время применяется в большинстве случаев, имеет

наибольшую агрессивность по отношению к изоляции обмоточных проводов и по отношению к коррозии (исключая, ингибированную скважинную).

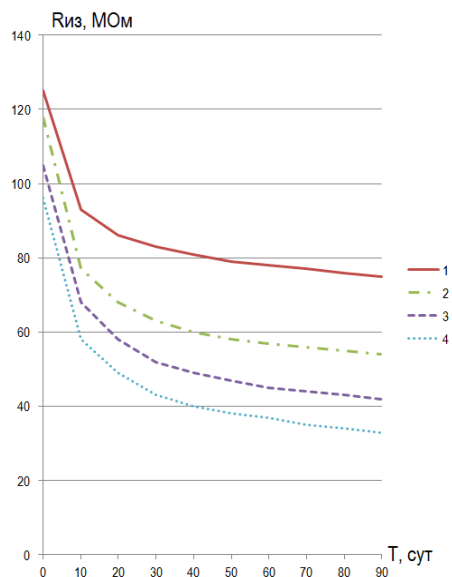


Рис. 6. Изменение межвиткового сопротивления изоляции ПЭД:
1 – в дистиллированной ингибированной воде; 2 – в дистиллированной воде;
3 – в обычной ингибированной воде; 4 – в скважинной ингибированной воде

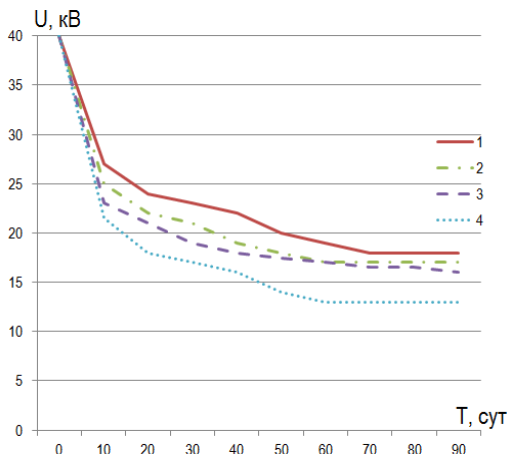


Рис. 7. Изменение пробивного напряжения корпусной изоляции:
1 – в дистиллированной ингибированной воде; 2 – в дистиллированной воде;
3 – в обычной ингибированной воде; 4 – в скважинной ингибированной воде

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, рекомендации для повышения надежности ПЭД следующие:

- совершенствование системы технического обслуживания;

– применение защиты от коррозии: коррозионностойких материалов, антикоррозийных покрытий, ингибиторов коррозии и материалов с низкой электропроводностью;

– применение в качестве охлаждающей среды дистиллированной ингибированной воды, что позволит повысить прочность изоляции обмоточных проводов и уменьшить коррозию элементов ПЭД;

– применение обмоточных проводов с улучшенными техническими характеристиками и композитных материалов, обладающих повышенной прочностью с улучшенными свойствами, в том числе, эффекта высокотемпературной сверхпроводимости;

– применение перспективных методов диагностики технического состояния ПЭД, например, оценка тока утечки $I_{ут}$ и угла потерь $tg\theta$, при напряжениях 500 В и 100 В, при этом при известном времени работы ПЭД при известном $I_{ут}$ определяют к какой группе относится изоляция контролируемого ПЭД и по $tg\theta$ проверяют группу изоляции. При несовпадении групп принимается решение на основании результатов измерений приращения токов утечки при изменении напряжения от 1000÷1100 В, если приращение не превышает 7,5 мкА, изоляцию относят к группе с большим гарантированным сроком безотказной работы, в противном случае – к группе с меньшим сроком;

– применение деталей и узлов ПЭД с равномерным оптимальным распределением нагрузок (тепловой, механической и электрической);

– замена асинхронных ПЭД на вентильные, повышение номинального напряжения и частоты вращения до 6000 об/мин, схемные и параметрические изменения конструкции и т.д.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Романов В. С., Гольдштейн В. Г., Васильева Н. С. Статистический анализ технологических нарушений в эксплуатации погружных электродвигателей для нефтедобычи // Теория и практика автоматизированного электропривода. 2018. [Электронный ресурс] URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/statisticheskiiy-analiz-tehnologicheskikh-narusheniy-v-ekspluatatsii-pogruznyh-elektrodvigately/viewer>.

2. Перельман О.М., Пещеренко С.Н., Рабинович А.И., Слепченко С.Д. Методика определения погружного оборудования и опыт ее применения [Электронный ресурс] URL: https://www.novomet.ru/science_files/452610572005.pdf.
3. Папков Б. В., Пашали Д. Ю. Надежность электроснабжения Учебное пособие – Уфа, УГАТУ, 2007 – 199 с. ил.
4. Кузнецов Н. Л. Сборник задач по надежности электрических машин: учебное пособие / Н. Л. Кузнецов. М.: Издательский дом МЭИ, 2008. 408 с.
5. КОРТУНОВ И. М., КРАЙНОВ И. Б., ЗЫМАН А.З. Обмоточный провод // Патент на полезную модель RU 93573U1 [Электронный ресурс] URL: <https://patents.google.com/patent/RU93573U1/ru>.
6. Месенжик Я. З., Осягин А. А. Кабели и провода для геофизических, гидрологических исследований и добычи полезных ископаемых. Энциклопедический справочник. Т.1. Тверь: Издательство ГЭРС – 2002. 564 с.
7. ТУ 16-705.159-80. Провода обмоточные теплостойкие с эмалевопленочной и пленочной полиимидно-фторопластовой изоляцией.
8. Мамедов А. А., Мамедов О. Г. Лабораторные исследования влияния среды на эксплуатационную надежность погружных двигателей // материалы Всероссийской научно-практической конференции. Челябинск. 2005. Kalsi S. S. Superconducting Wind Turbine Generator Employing MgB₂ Windings Both on Rotor and Stator //IEEE Transactions on Applied Superconductivity. – 2013. – Т. 24. – №. 1. – С. 47-53

Волченко В. Г., Смирнов Д. Н., Писарев В. В.
ФАУ «СибНИА им. С. А. Чаплыгина»

АНАЛИЗ ОСОБЕННОСТЕЙ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ГИБРИДНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК В МАЛОЙ АВИАЦИИ

Аннотация: В последние годы, вместо традиционных двигателей на углеводородном топливе, рассматривается использование гибридных систем или электрических двигателей в качестве движителей на борту летательных аппаратов. Это обусловлено экологическими требованиями, экономическими показателями и безопасностью полета. В данной работе рассматриваются особенности использования гибридных силовых установок на борту летательных аппаратов местных воздушных линий

Ключевые слова: гибридная силовая установка, электрификация самолета, малая авиация, местные воздушные линии.

ВВЕДЕНИЕ

Впервые электрическая энергия на борту летательного аппарата была использована А.И. Лодыгиным, который в 1868 году предложил проект использования электрического двигателя для привода воздушных винтов самолета. В качестве источника электрической энергии он предложил использовать аккумуляторные батареи.

Электрические технологии – новый виток инновационного развития в авиации и одно из наиболее перспективных направлений развития. Концепции гибридных самолетов или летательных аппаратов (ЛА) на аккумуляторах, которые в будущем могут потеснить традиционные пассажирские самолеты, становятся все ближе к своей реализации [1].

Современный двигатель на углеводородном топливе по мнению авиастроителей близок к исчерпанию резервов для дальнейшего совершенствования. Поэтому большие надежды на новую компоновочную и аэродинамическую схем ЛА связывают с электрическим двигателем.

Использование электромоторов для движения и двигателей внутреннего сгорания или газотурбинных двигателей для выработки энергии, позволяет снизить массу летательного аппарата, а также применить новые подходы к его проектированию. Конструкция гибридного самолета предполагает использование газотурбинной силовой установки в связке с генератором для выработки электричества, которым питаются электромоторы с воздушными винтами или вентиляторами. В среднем, по разным оценкам, такая конструкция позволит создать летательный аппарат, на десять процентов потребляющий меньше топлива, чем сопоставимый по характеристикам обычный самолет. При этом использование электромоторов позволяет существенно пересмотреть их количество и места размещения. Использование большого количества электромоторов или нетрадиционное их размещение приведет к необходимости пересмотреть аэродинамическую схему летательного аппарата.

Так же одним из вариантов силового агрегата можно рассмотреть классический тепловой двигатель и электродвигатель, объединенных в одно целое – гибридная силовая установка (ГСУ). По многим причинам такое решение на сегодняшний момент предпочтительнее одной только электрической тяге. Но такое решение потянет за собой одну проблему – усложненное обслуживание ГСУ по сравнению с электрической СУ.

Развитие ГСУ и их интеграция в состав летательных аппаратов различного назначения является одной из наиболее актуальных тенденций

развития рынка авиадвигателей: комбинация двигателя на углеводородном топливе и электрического мотора позволяет частично решить основные проблемы современной авиации – снизить вредные выбросы в атмосферу, снизить расход топлива, сформировать оптимальную конфигурацию силовой установки по мощности.

ОСОБЕННОСТИ ГИБРИДНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

В данном разделе рассмотрим особенности гибридных силовых установок (ГСУ), связанных с запаздыванием при их управлении, конструкцией и типом.

Эффективность эксплуатации ЛА напрямую зависит от уровня безопасности полетов, который, в свою очередь, определяется составом информационно-управляющих каналов бортового эргатического комплекса, а также собственной исправностью данного оборудования. Одним из способов обеспечения безопасности полетов летательных аппаратов является непрерывный контроль и диагностика отказов бортового оборудования на разных этапах его жизненного цикла. Основопологающим фактором построения системы поддержки эксплуатации ЛА является скорость локализации отказа и, по возможности, формирование гипотезы о причинах его наступления, а также непрерывность данного процесса на этапах производства, выходного и входного контролей, в процессе эксплуатации в составе объекта.

Ф. Особенности гибридных силовых установок, связанных с системами управления, которые обладают запаздыванием

Любая силовая установка – хоть традиционная, хоть гибридная, требует наличия системы управления. Система управления должна обеспечивать множество функций: (1) обеспечение безопасности полета, (2) обеспечение требуемых характеристик устойчивости и управляемости при управлении летательным аппаратом (ЛА), (3) предотвращение и предупреждение выхода за предельные режимы полета, (4) обеспечение автоматического и директорного

управления ЛА и ГСУ, (5) необходимую реконфигурацию при отказах [2]. Структурная схема ГСУ показана на рис. 1.

Система управления должна отслеживать все оборудование, в каком состоянии в данное время находятся те или иные органы управления (ЛА и силовой установкой), доступное наличие топлива и электрической энергии и т.п. И если все данные для анализа и управления будут собираться в одном централизованном месте, то это повлечет за собой увеличение объема кабельной сети ЛА, и как следствие больший общий вес системы.

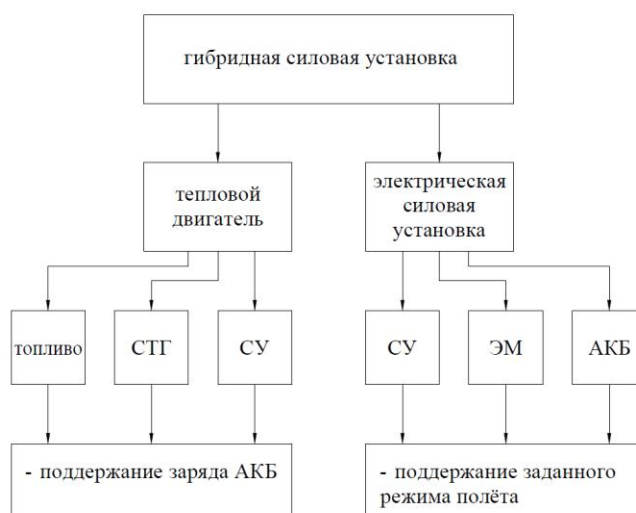


Рис. 1. Структурная схема гибридной силовой установки:
АКБ – аккумуляторная батарея, СТГ – стартер-генератор,
СУ – система управления, ЭМ – электрическая машина

Поэтому предпочтительнее разработать распределенную систему. Блоки управления должны находиться в непосредственной близости к исполнительным механизмам – это уменьшит длину кабельной сети. При этом целесообразно между блоками использовать цифровые линии связи. Данная конфигурация позволит повысить безопасность полета, минимизировать бортовую кабельную сеть, а также увеличить гибкость системы в целом. При такой распределенной системе необходимо реализовать самодостаточность каждой подсистемы в отдельности. Например, система управления двигателем на углеводородном топливе с генератором должна контролировать полностью все режимы работы данной установки, а система управления электрической

установкой должна следить за состоянием аккумуляторных батарей (АКБ), электрических двигателей (ЭД) и т.п.

Запаздывание при управлении присуще используемым в системах управления приводам. На современных самолетах наиболее распространены гидравлические приводы, выполняющие в комплексных системах дистанционного управления силовые функции и работающие совместно с электронными устройствами и датчиками параметров состояния. Для полностью электрического самолета могут быть применены два типа механизмов, используемые в системе управления самолетом – электромеханическая и электрогидростатическая.

Среди требований, предъявляемых к электрическим приводам систем управления самолета, можно выделить два основных: (1) оптимальные массоэнергетические показатели, (2) высокие динамические показатели. Основным звеном, определяющим параметры электрического привода, является электродвигатель.

Динамические показатели электрических приводов поверхностей управления самолетом определяются быстродействием системы электродвигатель-редуктор в связи с тем, что момент инерции редуктора и управляемой поверхности составляют несколько процентов от момента инерции электродвигателя, приведенного к оси вращения управляемой поверхности. Динамические свойства электродвигателя существенно зависят от частоты его вращения. Повышение частоты вращения электродвигателя приводит к ухудшению динамических показателей электрического привода. Таким образом, обеспечение высоких массоэнергетических и динамических показателей представляют два противоречивых требования, выполнение первого из которых требует высокой частоты вращения электродвигателя, а второго — низкой.

Электрогидростатическая система управления рассматривается обычно как дальнейшее развитие электродистанционной системы управления. Ее работа обеспечивается электросистемой, которая преобразовывает

управляющий сигнал, приходящий на гидропривод, в давление, создаваемое его минигидросистемой. В каналах воздействий, не требующих высокой скорости исполнения (например, в каналах уборки-выпуска шасси, закрылков, предкрылков и т.д.), гидроприводы могут исключаться полностью, заменяясь электроприводом.

Г. Особенности гибридных силовых установок, связанные с конструкцией

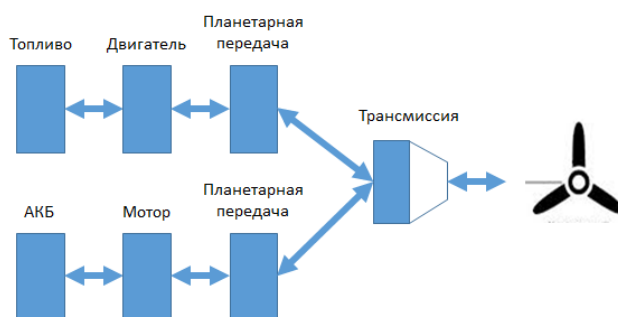
Гибридная силовая установка – это силовая установка, которая сочетает в себе несколько двигателей различных типов.

Существуют различные виды ГСУ, но здесь остановимся только на параллельной, последовательной и распределенной схемах.

1. Параллельная схема гибридной силовой установки

Параллельная схема ГСУ – это двигатель на углеводородном топливе с дополнительным подводом мощности на вал от электромотора (рис. 2).

Имеющиеся на борту летательного аппарата (ЛА) два источника энергии позволяют обеспечить безопасную посадку в случае отказа двигателя на углеводородном топливе на этапе крейсерского полета. В связи с этим, аккумуляторные батареи (АКБ) должны обеспечить полет ЛА на время, достаточное для безопасной посадки.



*Рис. 2. Параллельная схема ГСУ:
АКБ – аккумуляторная батарея*

Для самолета с одним движителем предпочтительно использовать параллельную схему ГСУ, состоящую из газовой турбины и электродвигателя с питанием от АКБ (рис. 3).

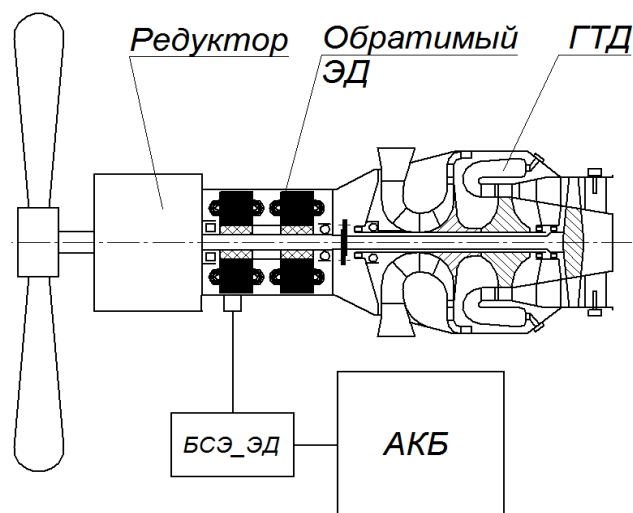


Рис. 3. Структурная схема ГСУ для модернизированного двигателя:
 АКБ – аккумуляторная батарея, БСЭ_ЭД – блок силовой электроники электрического двигателя, ГТД – газотурбинный двигатель

Особенность системы заключается в наличии редукторов для соединения/отсоединения электродвигателя от выходного вала турбины в соответствии с фазами полета (рис. 4). Следовательно, электродвигатель может использоваться для добавления мощности или выработки мощности на валу.

Достоинством параллельной схемы ГСУ можно выделить более высокий КПД передачи энергии от двигателя на углеводородном топливе к движителю в сравнении с последовательной схемой, при этом отпадает необходимость в стартере, так как электродвигатель может запускать двигатель на углеводородном топливе.

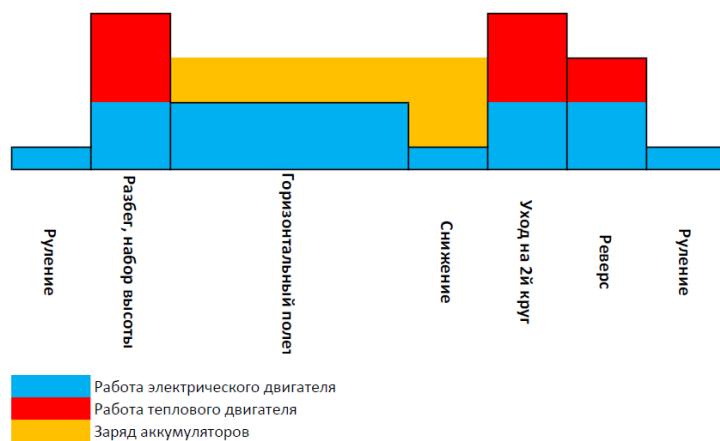


Рис. 4. График полета самолета с ГСУ

Недостатком параллельной схемы является усложнение трансмиссии для обеспечения отбора (подвода) мощности электрического двигателя и усложнение системы управления силовой установкой. Система управления ГСУ параллельной схемы должна: определять: необходимость в требуемом моменте для каждой силовой установки, необходимым для выполнения плана полета; точно синхронизировать обороты каждого двигателя, так как они механически связаны с одним валом (движителем).

2. Последовательная схема гибридной силовой установки

В последовательной схеме ГСУ двигатель на углеводородном топливе приводит в движение генератор для выработки электрической энергии. Энергия, вырабатываемая генератором, подается на электрический двигатель, или на электрический двигатель и на АКБ, или только на АКБ (рис. 5). Электрический привод движителя обеспечивает все режимы полета ЛА.

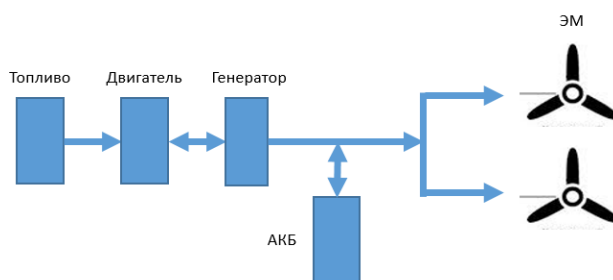


Рис. 5. Последовательная схема ГСУ:
АКБ – аккумуляторная батарея, ЭМ – электрическая машина

В летательном аппарате с ГСУ последовательной схемы тепловой двигатель вращает ротор электрического генератора с постоянной частотой, которая является оптимальной для двигателя на авиационном топливе, исходя из топливного потребления и степени износа его узлов. Это повышает надежность летательного аппарата. Применение гибридной силовой установки значительно повышает живучесть летательного аппарата.

Так как электрический генератор является основным источником энергии, обеспечивающим выполнение полета летательного аппарата, то эффективность всего летательного аппарата определяется в том числе и

характеристиками генератора. Из-за ограниченной мощности теплового двигателя и частоты вращения его вала, а также ограниченности габаритных размеров для размещения генератора для гибридной силовой установки предъявляются жесткие требования по массогабаритным характеристикам, плотности энергии, коэффициенту полезного действия и отказоустойчивости [3].

Достоинствами последовательной схемы ГСУ являются возможность работы двигателя на углеводородном топливе на постоянном режиме оптимального расхода топлива и простота управления силовой установкой, возможность компоновки ЛА и более рациональное размещение ГСУ.

Недостатками последовательной схемы ГСУ являются большие потери энергии при превращении энергии от двигателя на углеводородном топливе до двигателей из-за двукратного ее превращения: механической в электрическую, а затем электрической в механическую.

3. Распределенная силовая установка

Создание летательного аппарата, оптимально сочетающего взлет и посадку с ограниченных неподготовленных площадок и полет с высокой топливной эффективностью имеет особую актуальность для Российской Федерации в связи с необходимостью доставки людей и грузов в удаленные труднодоступные районы, зачастую имеющие слабо подготовленные грунтовые взлетно-посадочные площадки, снежные или ледовые аэродромы и слаборазвитую дорожную инфраструктуру.

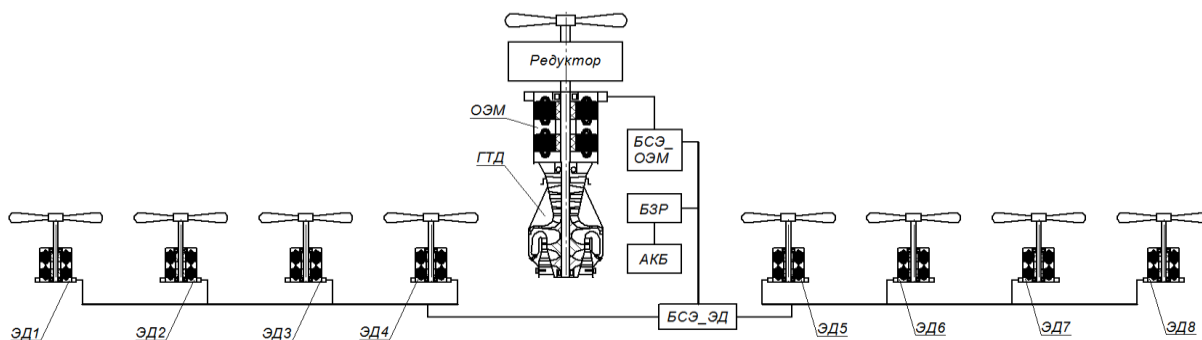


Рис. 6. Структурная схема ГСУ с распределенной силовой установкой

Основным преимуществом ЛА самолетного типа перед вертолетной схемой является более простая конструкция, меньший расход топлива, более высокая скорость и дальность, и как следствие существенно более низкая стоимость перевозок. В то же время недостатком самолетов традиционной схемы является взлетная и посадочная дистанции, требующие протяженных подготовленных площадок для разбега/пробега.

Компромиссом между летательными аппаратами вертикального взлета и посадки и более экономичными традиционными (классическими) самолетами, использующими взлетно-посадочные полосы большой длины, являются ЛА короткого (сверхкороткого) взлета и посадки.

Одним из перспективных вариантов сокращения взлетно-посадочной дистанции в ЛА сверхкороткого взлета и посадки является значительное увеличение (в 2...3 раза) подъемной силы за счет использования более мощной взлетно-посадочной механизации крыла в сочетании с интенсивной обдувкой его струями от распределенной силовой установки (PCY). Обдув крыла осуществляется маршевой винтомоторной установкой и дополнительной распределенной силовой установкой (рис. 6).

Силовая установка самолета является гибридной и состоит из маршевой силовой установки и распределенной силовой установки, основное обеспечение которой – обеспечение сверхкороткого взлета и посадки.

Маршевая силовая установка состоит из турбовинтового двигателя, расположенного в носовой части фюзеляжа, на валу которого установлен тянущий воздушный винт изменяемого шага. Распределенная силовая установка работает на этапе взлета и посадки (может работать и в аварийной ситуации) и состоит из восьми электрических двигателей с воздушными винтами фиксированного шага, лопасти которых в крейсерском полете складываются вдоль обтекателей мотогондол. Электровинтомоторные установки размещены под крылом самолета по четыре двигателя на каждой консоли с выносом вперед относительно передней кромки крыла. Крыло в корневой части крыла оснащено двухзвенными трехщелевыми закрылками,

отклоняемыми носками, зависающие щелевые элероны на концевых частях и отклоняемые предкрылки по всему размаху.

Интенсивный обдув крыла в данной компоновке осуществляется воздушными винтами небольшого диаметра, расположенными вдоль всего размаха крыла и приводимыми в действие компактными электродвигателями, получающими энергию от восьми аккумуляторов, сравнительно небольшой емкости, которых достаточно для кратковременных этапов взлета и посадки. По окончании работы распределенной силовой установки, состоящей из 8 электродвигателей после набора безопасной высоты и скорости лопасти воздушных винтов РСУ автоматически складываются вдоль обтекателей мотогондол для снижения аэродинамического сопротивления на крейсерском режиме полета. Перед посадкой самолета при включении РСУ лопасти также автоматически раскрываются в рабочее положение.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оснащение гибридной силовой установкой не только вновь разрабатываемых, но и существующих ЛА является по предварительным оценкам так же технически осуществимым и целесообразным с целью повышения топливной эффективности и улучшения отдельных ЛТХ.

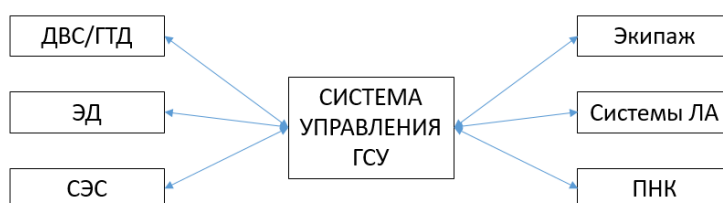


Рис. 7. Связи системы управления ГСУ

Подводя итог можно отметить, что использование любой из этих схем невозможно без интеллектуальной системы, алгоритмы работы которой связывают все системы самолета, в том числе и управление летательным аппаратом (рис. 7). Система должна иметь наибольшую скорость обмена данными между управляющими устройствами и исполнительными

механизмами. Она должна быть безопасной на всех режимах работы ЛА и уметь находить любое отклонение от штатной работы всех систем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Халютин С.П., Давидов А.О., Жмуров Б.В. Электрические и гибридные самолеты: перспективы создания // Электричество. 2017. №9. С. 4–16.
2. Терпугов А.В., Оболенский Ю.Г., Оболенский В.Ю. Опциональное управление маневренными самолетами: поиски, проблемы, решения // Математические методы в технологиях и технике. 2022. № 5. С. 14-18.
3. Noland J.K., Leonardo M., Suul J.A., Molinas M., Nilssen R. Electrical machines and power electronics for starter-generators in more electric aircrafts: a technology review // IECON 2019 – 45th Annual conference of the IEEE industrial electronics society, 2019. P. 6994–7001.

Галиев Р. Д., Иванов М. В., Кадыров А. А., Дойников А. И.
Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКА ДЫМА С ВОЗМОЖНОСТЬЮ СЕТЕВОГО ПОДКЛЮЧЕНИЯ¹

Аннотация: Современные датчики дыма могут служить частью умного дома и оповещать о пожаре через уведомление на телефоне, что позволяет узнать о проблеме даже при нахождении на расстоянии от нее. Зачастую из-за отсутствия данного типа устройства погибает значительное количество людей, пожары приносят значительные повреждения в связи с несвоевременным началом тушения. Основная функция датчика дыма – оповестить об опасности. В настоящей работе ведется разработка и исследование отечественного датчика дыма с возможностью сетевого подключения.

Ключевые слова: датчик, дым, извещатель, оптический, ионизационный датчик, чувствительный элемент.

ВВЕДЕНИЕ

Основная задача датчика дыма — уловить дым в помещении на ранних стадиях развития пожара и известить об этом хозяев дома либо аварийные службы. Если своевременно оповестить людей о пожаре, то вероятность гибели людей существенно снижается, что подтверждается печальной статистикой со всего мира [1]. Сами по себе дымовые извещатели не могут обеспечить защиту от пожара, но они являются важнейшей частью противопожарной системы и выполняют важную функцию оповещения.

¹Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий из бюджета Республики Башкортостан аспирантам и молодым ученым, тема АП-ЭМ-02-21-ГБ.

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ

На практике реагирование датчика может осуществляться за счет появления дыма, повышения температуры или выделения определенных газов. Существуют устройства, реагирующие только на один из перечисленных параметров или сразу на несколько.

Датчик, регистрирующий несколько параметров пожара, позволяет наиболее точно определить возникновение пожара. Однако, такой датчик является наиболее дорогостоящим. Обобщенное устройство датчика дыма, регистрирующего несколько параметров, приведено на рис. 1.

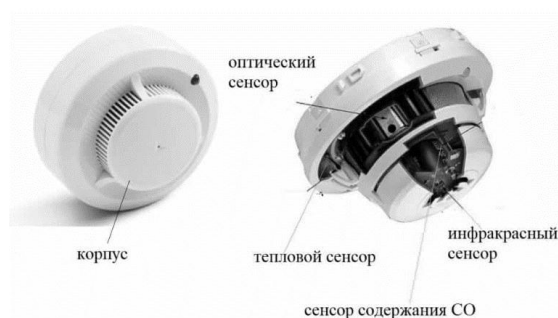


Рис. 1. Строение оптического датчика дыма [2]

Конструктивно датчик пожарной сигнализации состоит из следующих составляющих:

- (1) корпус – предназначен для защиты чувствительных элементов датчика от оседания пыли;
- (2) оптический сенсор - представляет собой фотоприемник, реагирующий на изменение степени освещенности;
- (3) тепловой сенсор – фиксирует изменения температуры;
- (4) сенсор содержания CO, CO₂ – контролирует процент содержания угарного газа и двуокиси углерода, как неотъемлемых составляющих продуктов тления и горения;
- (5) инфракрасный чувствительный элемент – предназначен для фиксации светового излучения в определенной области.

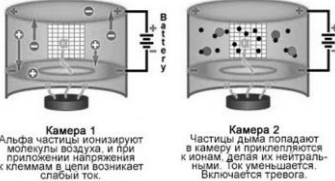
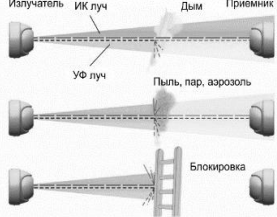
На этапе эксплуатации крайне важно контролировать чувствительность извещателей и ее соответствие заданному диапазону. Обычно датчики дыма содержат меньшее количество чувствительных элементов [3], так как при этом они позволяют с высокой точностью определить возникновение пожара, а их габариты, масса и стоимость могут быть существенно уменьшены.

Виды устройств и принципы работы

Дымовые извещатели делятся на две большие группы: ионизационные и оптические. Сравнение групп датчиков дыма приведено в таблице 1.

Таблица 1

Принцип действия ионизационного и оптического датчика дыма [4]

Ионизационный датчик дыма	Оптический датчик дыма
<p style="text-align: center;">Принцип действия ионизационного детектора дыма</p>  <p>Камера 1 Альфа-частицы ионизируют молекулы воздуха, и при приложении напряжения к клеммам в цепи возникает слабый ток.</p> <p>Камера 2 Частицы дыма попадают в камеру и приклепляются к ионам, делая их нейтральными. Ток уменьшается. Включается тревога.</p>	 <p>Излучатель ИК луч Дым Приемник</p> <p>УФ луч</p> <p>Пыль, пар, аэрозоль</p> <p>Блокировка</p>

Наиболее часто используются оптические точечные извещатели, которые стоят дешево, но при этом способны решать все необходимые задачи. Выбор конкретного типа датчика дыма обычно зависит от помещения, а также от цены, которая приемлема для покупателя. В большинстве случаев достаточно недорогих решений, которые способны оперативно засекают задымления и оповещать о них. Исходя из данных соображений решительно создавать оптический датчик дыма.

Подробнее остановимся на наиболее оптимальном варианте, обладающем сравнительно невысокой ценой и выполняющим необходимые функции – оптическом датчике дыма.

Принцип работы оптического извещателя дыма базируется на рассеивании потока света при его прохождении через частицы дыма. Светодиод создает световой поток, который улавливается приемником. Микропроцессор

извещателя заранее знает о параметрах светового потока и при их изменении срабатывает сигнал тревоги. Недостатком такого датчика является вероятность срабатывания не только от дыма, но и от любого воздействия, которое изменит параметры светового потока (пыль, пар и т. д.). Также может улавливаться отражение светового потока. Цвет дыма может влиять на реакцию оптического датчика. В свою очередь, оптические дымовые извещатели делятся на три типа: точечные, аспирационные и линейные.







Рис. 2. Пример срабатывания оптического датчика дыма [3]

Для подбора датчика дыма приведена сравнительная таблица [5], [6].

Таблица 2

Сравнение существующих датчиков дыма

Вид	Извещатель пожарный точечный оптико-электронный ИП 212-189А "Сверчок"	Извещатель оптико-электронный с помехозащищенностью от домашних животных Пирон-4	Извещатель пожарный дымовой оптико-электронный адресно-аналоговый ИП 212-64-R3 W1.01	Дымовой оптико-электронный пожарный извещатель, адресно-пороговый
1	2	3	4	5
Наименование	ИП 212-189А "Сверчок"	Пирон-5 (ИО 409-56)	ИП 212-64-R3 W1.02	ДИП-34ПА исп.03
Производитель	Общество с ограниченной ответственностью "Элемент"	Общество с ограниченной ответственностью "Элемент"	Рубеж	Болид

1	2	3	4	5
Преимущества	1. повышенная защищенность от электромагнитных помех 2. собственный контроль работоспособности 3. непрерывная работа 4. пожаробезопасная конструкция	1. зона обнаружения без искажений 2. микро-процессорная обработка сигнала 3. устойчив к засветке более 6500 лк 4. отсутствие ложных тревог	1. измерение концентрации дыма 2. формирование и передача сигнала «Неисправность» 3. автоматическую компенсацию запыленности дымовой камеры для исключения ложных срабатываний 4. тестирование работоспособности с помощью кнопки или специального оптического тестера ОТ-1	1. устойчив к электромагнитным помехам 2. непрерывная работа 3. долгий срок службы
недостатки	1. Неисправность оптического узла 2. В зоне оптического узла находится пыль 3. требуется своевременная очистка дымовой камеры	1. нет потолочного крепления 2. нет кронштейна в комплекте	1. Индикатор не мигает 2. нет связи с прибором 3. требуется ремонт	1. требует дополнительных креплений 2. не защищен от агрессивных сред, пыли, взрывоопасных помещений.
Фото				
Стоимость, руб.	435	890	1281	1362
Размеры, мм	Ø85×48	105x75x56	Ø93×44	Ø100×47
Вес, г	150	не более 100	120	200
Срок службы	до 2-х лет	до 5 лет	менее 10 лет	10 лет
Максимальная температура Эксплуатации, °С	55	50	55	55
Чувствительность извещателя, дБ/м	0.05...0.2	0.05...0.2	0.05...0.2	0.05...0.2

О чувствительности датчика дыма и о ее контроле имеет смысл вести речь, если конструкция, схемотехника, элементная база и технология изготовления дымового извещателей обеспечивают стабильность характеристик, то есть имеется незначительный разброс по чувствительности от экземпляра к экземпляру – при изменении направления и скорости воздушного потока, при изменении напряжения питания, температуры окружающей среды и влажности.

Чувствительность оптических извещателей выбирают в пределах 0,05–0,2 дБ/м. Извещатель активизируется при незначительном задымлении среды, при ослаблении оптического сигнала на дистанции в 1 м на 1,14-4,5%, соответственно, на дистанции 10 м – на 11-37%. При удельной оптической плотности дыма 0,2 дБ/м видимость составляет примерно 50 м. Учитывая, что на первом этапе развития очага задымление присутствует только в верхней части помещения, сигнал от дымового извещателя со стандартной чувствительностью порядка 0,1–0,12 дБ/м должен давать большие возможности по пресечению развития пожара, защите людей и имущества [7].

УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ОПТИЧЕСКОГО ДАТЧИКА ДЫМА

Научно-исследовательским коллективом была спроектирована электрическая схема датчика дыма, приведенная на рис. 3.

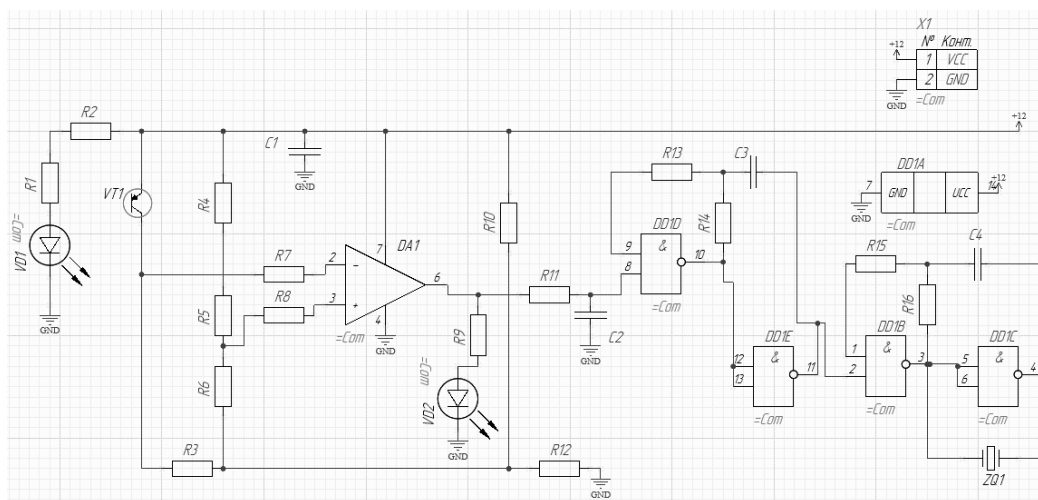


Рис. 3. Электрическая схема датчика дыма

При выборе датчика дыма учитывали несколько характеристик: стоимость, чувствительность, вес, срок службы, температура и размеры. Сравнительный анализ различных видов датчиков дыма показал, что для серийного производства оптимальным вариантом является оптический датчик. Чувствительность разрабатываемого датчика зависит от настройки яркости свечения инфракрасного диода.

Ниже представлено изображение трехмерной модели печатной платы разрабатываемого датчика дыма.

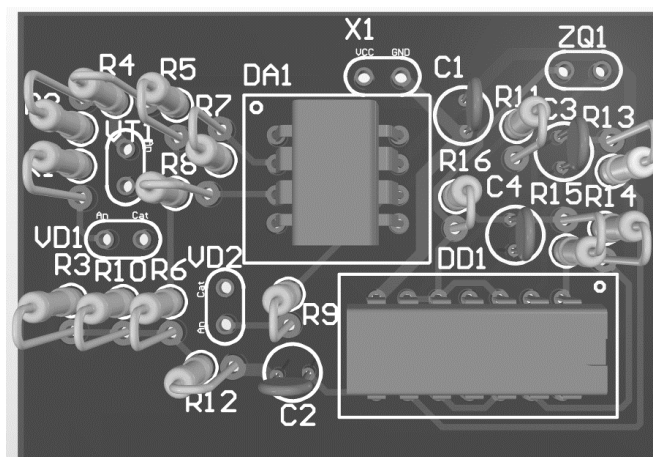


Рис. 4. Трехмерное изображение печатной платы разрабатываемого датчика дыма

Принцип работы датчика заключается в том, что инфракрасный луч от светодиода попадает на фототранзистор, от чего тот открывается и на его коллекторе появляется положительное напряжение, которое через резистор поступает на инвертирующий вход операционного усилителя. На второй вход операционного усилителя поступает опорное напряжение. При этом на выходе операционного усилителя устанавливается напряжение близкое к нулю, светодиод не светится, а цифровая микросхема оказывается в запертом состоянии. При возникновении дыма на пути светового потока от инфракрасного диода фототранзистор начинает замечать ухудшение видимости. То есть при ухудшении прозрачности воздуха, светодиод загорится, а пьезоизлучатель будет издавать сигналы тревоги. В режиме охраны устройство потребляет близкие к нулю токи, основным потребителем

выступает светодиод. Схема рассчитана на напряжение питания 12 вольт. Стоимость разрабатываемого датчика дыма не превышает стоимость аналогов с учетом стоимости корпуса и крепежа. У разрабатываемого датчика имеется световая индикация рабочего режима и состояния «Тревога», а также звуковое оповещение как о пожаре.

Разрабатываемый датчик может монтироваться на стене или потолке. Размеры печатной платы разрабатываемого датчика дыма – 100 x 48 мм, вес – не более 0,15 кг.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАТЧИКА ДЫМА

Ниже приведены изображения макетной платы разрабатываемого датчика дыма и графики сигналов пьезоизлучателя.

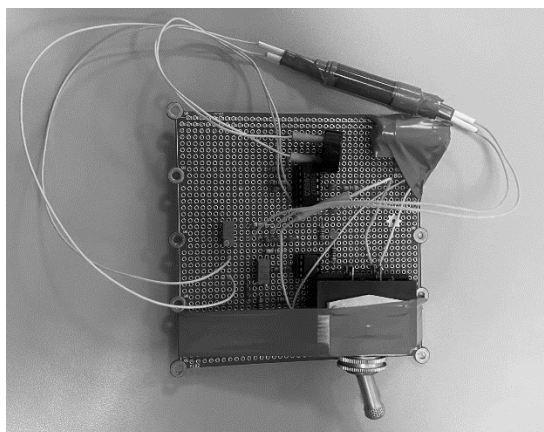


Рис. 5. Изображение макетной платы разрабатываемого датчика дыма



Рис. 6. График сигнала на пьезоизлучателе в открытом состоянии на осциллографе

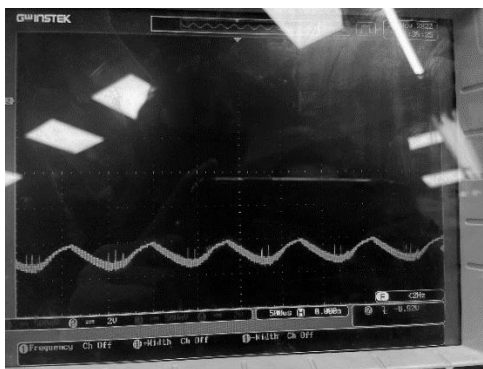


Рис. 7. График сигнала на пьезоизлучателе в закрытом состоянии на осциллографе

Экспериментальные исследования разрабатываемого датчика дыма доказали его работоспособность.

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ДАТЧИКА ДЫМА

К выбору датчика дыма нужно подходить ответственно и не ставить цену на первый план, так как от исправной работы этого изделия зависит собственная безопасность, безопасность людей, находящихся в помещении, в котором установлен датчик. Сегодня пожарные извещатели должны быть установлены в каждом доме, независимо какого типа здания. Выбор датчика из линейки того или иного производителя, а, следовательно, комплектующих к нему (монтажных колец, крепежа, приборов/устройств для проверки работоспособности), зависит в основном от объективного/субъективного мнения специалистов проектных организаций, специализированных монтажно-наладочных организаций, основанного на личном опыте использования таких датчиков дыма.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В дальнейшем в рамках разработки отечественного датчика дыма планируется совершенствование его принципиальной схемы для возможности его работы в проводной и беспроводной сетях. Сигнал от управляющей микросхемы разрабатываемого датчика может служить основой для

обеспечения его работы в проводной или беспроводной сети. Планируется установка wi-fi модуля на разрабатываемом датчике дыма для обеспечения возможности передачи информации в приложение на мобильном телефоне и интеграции датчика с системами умного дома. При этом, если в одном помещении установлено несколько датчиков дыма, достаточно оборудовать wi-fi модулем только один из них при условии их проводного соединения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. URL: <https://tze1.ru/articles/detail/dymovye-izveshchateli-vse-что-nuzhno-znat/> (дата обращения 8.11.22)
2. URL: <https://www.asutpp.ru/pozharnyy-izveschatel.html> (дата обращения 11.11.22)
3. URL: <https://tion.ru/blog/datchiki-dyma/> (дата обращения 12.11.22)
4. URL: <https://fireman.club/statyi-polzovateley/datchiki-dyima-naznachenie-vidyi-i-osobennosti/> (дата обращения 12.11.22)
5. URL: <https://www.tinko.ru/catalog/product/292912/> (дата обращения 12.11.22)
6. URL: <https://www.aktivsb.ru/prod-45734.html> (дата обращения 12.11.22)
7. URL: <https://tze1.ru/articles/detail/dymovye-izveshchateli-vse-что-nuzhno-znat/> (дата обращения 15.11.22)

Галиева А. А., Пашали Д. Ю., Хусаинов Т. Д., Фаррахова Р. А.
Уфимский университет науки и технологий

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕСТРОЕНИЯ¹

Аннотация: В настоящее время согласно Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2035 года основным направлением государственной политики по развитию автомобильной промышленности является создание производств инновационного транспорта - электрических и гибридных автомобилей, включая автомобили на водородных топливных элементах, автономных автомобилей, а также, создание новых производств компонентов и материалов для электрического и гибридного транспорта с наращиваем их экспорта, включая тяговые батареи, ячейки к ним, катодные и анодные материалы, другие компоненты и материалы 1. Аккумуляторная батарея является критическим компонентом электромобиля, и устойчивое производство электротранспортных средств невозможно без наличия собственной технологической цепочки производства, от сырья до конечного изделия 2. В Российской Федерации имеются достаточные компетенции для конструирования тяговых батарей для электротранспорта, но в то же время отсутствует производство ячеек литий-ионных аккумуляторов с необходимой удельной энергией и в достаточном объеме.

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

ВВЕДЕНИЕ

В связи с текущей геополитической ситуацией, в 2022 году автомобильная промышленность РФ испытывает существенное снижение спроса на внутреннем рынке, наблюдается остановка и приостановка ряда автомобильных производств, связанная с уходом иностранных производителей с российского рынка, а также со сложностями поставок значимых комплектующих и материалов. Для развития национального производства автомобилей, конкурентоспособных на мировом уровне, необходимо научно-технологическое развитие всей отрасли, основанное на национальных технологиях и инженерных кадрах.

В настоящее время в мировой автомобильной промышленности активно развиваются технологии альтернативных видов топлива, развитие электротранспорта является основным трендом среди альтернативных энергоустановок, что обусловлено значительным удешевлением производства тяговых батарей.

Развитие электромобилей имеют следующие тенденции 1:

- развитие гибридных автомобилей;
- развитие электромобилей.

В связи с отсутствием станций зарядки на дорогах общего назначения и ввиду малого запаса энергии источников питания ограничивает использование электромобилей в северных и малонаселенных регионах РФ и стимулирует развитие электротранспорта в крупных городах и регионах с умеренными климатическими условиями.

Таким образом, развитие электромобильного транспорта необходимо не только для достижения климатической нейтральности и ограничения выбросов парниковых газов (CO₂) и декарбонизации, но и для развития национального производства новых видов транспорта, в том числе развитие производства гибридных силовых агрегатов, электромобилей, автотранспорта с использованием альтернативных видов топлива 3.

В настоящее время развитие отечественного автомобилестроения невозможно без создания собственных платформ и энергетических систем (аккумуляторных батарей и в дальнейшем топливных элементов на основе отечественных разработок). Так как конкурентоспособность электромобилей зависит именно от аккумуляторов: именно они формируют до половины себестоимости электрокара и определяют его характеристики по пробегу и удобству эксплуатации.

ДОСТОИНСТВА И НЕДОСТАТКИ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

Электромобиль – автомобиль, приводимый в движение одним или несколькими электродвигателями с питанием от автономного источника электроэнергии (аккумуляторов, топливных элементов и т. п.), а не двигателем внутреннего сгорания. Электромобили появились на 50 лет раньше первого автомобиля, что было обусловлено открытием Фарадея о явлении электромагнитной индукции, после которого все изобретатели и инженеры были увлечены путями его практического применения.

Как и все виды транспорта электромобили обладают достоинствами и недостатками 3.

А. Достоинства электромобилей

1. Не загрязняют атмосферу. Электрические моторы не выделяют вредных выхлопных газов, благодаря чему они не только являются экологически чистыми, но и не нуждаются в системе отвода выхлопа, что еще больше упрощает конструкцию автомобиля, делая его легче и практичнее 3.

2. Дешевая электроэнергия. Стоимость полной зарядки батареи в несколько раз ниже, чем полная заправка бака.

3. Минимум расходных материалов. Благодаря простоте конструкции электрический двигатель не нуждается в частом обслуживании и затратах на расходные материалы (масла, фильтры и так далее).

4. **Бесшумная работа.** Электромоторы работают гораздо тише, благодаря чему им не требуется система глушения громкого звука, а также шумоизоляция салона.

5. **Высокий уровень КПД электромотора.** КПД электромотора достигает 95%, таким образом практически вся энергия расходуется только на движение автомобиля. Для сравнения, двигатели внутреннего сгорания имеют КПД около 40%. Это объясняется тем, что в ДВС имеются довольно большие потери тепла на корпусе. Кроме того, мощность значительно теряется из-за множества трущихся деталей. Электродвигатель же практически лишен этих недостатков и поэтому требует меньше затрат энергии.

6. **Комфорт и динамика езды.** Динамичность электрических моделей дает очень приятные ощущения во время поездки. Электродвигатель отличается в работе от ДВС, ему не требуется время на разогрев, поэтому он сразу может выдавать максимальный крутящий момент, а значит, быстро и плавно разгоняться. То же касается и торможения: оно более плавное и комфортное. На резких поворотах электромобили маневреннее и легче поддаются управлению за счет хорошего баланса.

В. Недостатки электромобилей

1. **Ограниченный запас хода** – это один из немногих недостатков электромобилей. Однако этот недостаток довольно существенный, если учитывать тот факт, что в настоящее время далеко не всегда и везде можно найти электрозаправочную станцию.

2. **Стоимость машины с электрическим мотором**, как правило, на 30% выше стоимости аналогичного автомобиля с двигателем внутреннего сгорания и в данном случае необходимо учитывать стоимость батареи, ведь одна она может иметь цену половины автомобиля.

3. **Проблема с обогревом салона.** При отоплении салона автомобиля тратится значительная часть запаса энергии аккумулятора, из-за чего запас хода существенно снижается. Кроме этого, одновременное включение таких мощных потребителей дает сильную нагрузку на силовую часть, из-за чего она

может перегреваться, а сильный нагрев батареи ведет к уменьшению ее емкости.

ИСТОРИЯ РАЗВИТИЯ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА В РФ

История развития электротранспорта в России начинается с 30 марта 2007 года, когда впервые в РФ электромобиль, переоборудованный И. Корховым с помощью научного работника и общественного деятеля Ю.Ю. Шулипы из обычного автомобиля, получил заключение по допуску к участию в дорожном движении и был зарегистрирован в органах ГИБДД 4.

В 2009 году в Санкт-Петербургском государственном политехническом университете сконструировали первый в России солнечный электромобиль (СЭМ). За ночь его можно зарядить от обычной электросети, а днем он питается от солнечных батарей, расположенных на капоте. Скорость СЭМа — 40 км/ч, а запас хода на одной зарядке аккумуляторной батареи — 60 километров. Электродвигатель мощностью 3 кВт.

В 2012 году в серию запущен электромобиль EL Lada по инициативе министра энергетики, промышленности и связи Ставропольского края Саматова Дмитрия Рафаиловича. Lada Ellada получила практическое применение в городе-курорте Кисловодск Ставропольского края, в качестве легкового такси. Этот проект стал первым в России по использованию электромобиля в пассажирских перевозках 1.

14 июля 2013 года в столице и на территории новой Москвы прошел первый в России экопробег электромобилей «Изумрудная планета», в котором приняли участие политики, журналисты, звезды и представители бизнеса. Экопробег проходил при поддержке Департамента развития новых территорий Москвы и Департамента транспорта и развития дорожно-транспортной инфраструктуры города Москвы. Инициатором проведения экопробега выступила Экологическая инициатива «Изумрудная планета» и ее лидер, эколог Елена Шаройкина. Целью акции было привлечь внимание власти и широкой общественности к экологическим и инфраструктурным проблемам

мегаполиса, а также к современному новому виду транспорта как способу уменьшить нагрузку на окружающую среду.

Электромобили в России могут получить зеленые номера. Об этом рассказал советник одного из руководителей рабочей группы НТИ «Автонет» Роман Малкин. По его словам, эта инициатива уже одобрена «Автонетом» и станет началом «масштабной работы по популяризации электромобилей», а также сделает экологичный транспорт узнаваемым.

21 ноября 2022 года «Автостат» сообщил о росте продаж новых электромобилей в России на 34%. По данным аналитического агентства за 10 месяцев в 2022 году было продано новых 2090 электромобилей, что более чем на треть выше, чем за тот же период годом ранее. Самой популярной стала Tesla, на автомобили этой марки пришлось 39% продаж. Увеличение продаж электромобилей произошло на фоне сокращения рынка новых легковых и легких коммерческих автомобилей, который сократился на 60,8% 5.

ВИДЫ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ ЭЛЕКТРОМОБИЛЕЙ

С. Аккумуляторные батареи

Аккумуляторные электромобили являются самым первым и простым видом электромобилей. Первые работоспособные модели были построены еще в конце XIX века. Активно использовались в США вплоть до 20-х годов XX века. В течение 30—40-х гг. наиболее активно применялись в Германии. С 1947 г. широко используются в Англии.

Принципиальная схема аккумуляторного электромобиля в общем случае следующая: аккумуляторная батарея через силовую электропроводку и систему регулирования (управления) тягового электродвигателя соединяется с тяговым электродвигателем, который, в свою очередь, передает главной передаче крутящий момент.

Технико-экономические параметры данного типа электромобилей, прежде всего, зависят от характеристик применяемых аккумуляторных батарей. Величина желаемого пробега электромобиля на один заряд батареи (запас хода)

прямо пропорциональна отношению веса аккумуляторной батареи к полному весу электромобиля. Зависимость веса батареи от грузоподъемности электромобиля значительно выше, чем зависимость веса карбюраторного двигателя от грузоподъемности автомобиля 4.

D. Топливные элементы

Характерной особенностью электромобилей, оснащенных топливными элементами (ТЭ), является то, что масса энергосиловой установки не изменяется при изменении ее энергоемкости, а увеличение запаса хода может быть достигнуто за счет увеличения массы топлива в топливных баках (как в автомобилях с ДВС).

Таким образом, с одной стороны, ТЭ позволяют существенно повысить запас хода электромобиля, но, с другой стороны, топливо для них имеет высокую стоимость, а также может быть токсичным и при переработке в ТЭ выделять в атмосферу вредные вещества 3. В электромобилях с воздушно-алюминиевыми электрохимическими генераторами для получения электрического тока используется процесс окисления алюминия в воздушно-алюминиевом топливном элементе.

E. Солнечные батареи

Существует множество конструкций электромобилей на солнечных батареях, так называемых «солнцемобилей», однако их общей проблемой является низкий КПД батарей (обычно порядка 10 – 15 %, передовые разработки позволяют добиться 30 %), что не позволяет запасать значительное количество энергии за день, сокращая суточный пробег; к тому же солнечные элементы бесполезны ночью и в пасмурную погоду 6. Вторая проблема — дороговизна солнечных батарей.

Среди примеров солнцемобилей можно назвать прототипы Venturi Astrolab, Venturi Eclectic (дополнительно оснащенный ветровой установкой), концепт-кар ItalDesign-Giugiaro Quaranta (впрочем, энергии, которую накапливают солнечные батареи, хватает в нем разве что на питание бортовой электроники), итальянский Phylla, а также SolarWorld GT, который в 2012 году

совершил кругосветный марафон. Последний оборудован двумя мотор-колесами Loebbetomotor номинальной мощностью 1,4 кВт каждое (пиковая мощность — 4,2 кВт каждое, или в сумме — 11,42 лошадиные силы) 6. Благодаря малой массе (карбонный кузов позволил добиться веса 260 кг, сам кузов весит 85 кг) и аэродинамически совершенной форме кузова ($C_x = 0,137$), удалось добиться максимальной скорости 120 км/ч. Круизная скорость — 50 км/ч (при работе моторов на номинальной мощности), на ней SolarWorld GT может проехать 275 км — больше, чем многие современные электромобили. Этот пробег обеспечивает 21-килограммовая литий-ионная батарея емкостью 4,9 кВт·ч.

Ф. Комбинированные энергоустановки

В конце 1960-х и начале 1970-х годов был разработан ряд опытных образцов электромобилей с энергосиловыми установками типа «Аккумуляторные батареи — Топливные элементы»:

В Англии на базе DAF 44 был создан электромобиль со смешанной системой питания от аккумуляторных батарей и от гидрозийно-воздушных ТЭ с удельной мощностью 160 Вт/кг. При разгоне основная нагрузка ложилась на батареи, в остальных режимах — на топливные элементы, подзаряжающие аккумуляторную батарею.

В США на базе Austin A-40 был изготовлен электромобиль с комбинированной системой, включающей щелочные водородно-воздушные элементы и свинцово-кислотные аккумуляторные батареи. Запас хода достигал 320 км.

Г. Никель-кадмиевые и никель-железные батареи

Никель-кадмиевые и никель-железные батареи схожи в характеристиках и конструкции. Никель-железные батареи большой емкости применяются в тяговых батареях, они характеризуются повышенным саморазрядом и низким током разряда 1. Электроды никель-кадмиевые и никель-железных аккумуляторов бывают ламельными и безламельными, трубчатыми и таблеточными.

Н. Литий-ионные аккумуляторы

Литий-ионные аккумуляторы – наиболее перспективный источник тока. Отрицательный электрод литий-ионного аккумулятора производят из углеродных материалов 5. В данном типе аккумулятора в качестве отрицательного электрода используются не металлический литий или его сплавы с другими металлами, а интеркаляционное соединение углерода с литием. Для достаточно высокого напряжения аккумулятора в качестве активного материала используются: литированные оксиды кобальта, марганцевая шпинель, литированный фосфат железа и также мультиоксиды (смешанные оксиды).

ТЕКУЩАЯ СИТУАЦИЯ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

Россия испытывает некоторые сложности по внедрению электромобилей, несмотря на ряд льгот для их владельцев. Среди сложностей: малое количество заправок, климат, в зимний период холод будет негативно влиять на аккумуляторы, снижая пробег на одной зарядке в 2–3 раза. Почти полное отсутствие инфраструктуры для его обслуживания. В настоящее время специальными колонками для заправки электрокаров оборудованы только Москва, Ставропольский край и Санкт-Петербург.

В 2021 г. правительство РФ утвердило «Концепцию по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года» 1. Реализация проекта поделена на два этапа: первый должен быть завершен к 2024 году с показателем собственного производства в 25 тысяч электромобилей; второй рассчитан на период 2025 - 2030 гг., запланированное производство должно составить примерно 220 тысяч машин. Общий электроавтопарк к концу нынешнего десятилетия должен составлять около 1,4 миллиона машин. Запланировано в течение 2021-24 гг. строительство 9400 зарядных станций 1.

Анализ реализации Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации на период до 2030 года, свидетельствует о том, что

успешно выполнен ряд задач. Так, к 2021 году обеспечены потребности рынка за счет внутреннего производства автомобилей на 80-90% по легковым автомобилям, легким коммерческим автомобилям и автобусам (это целевой уровень к 2025 году) и 68% по грузовым автомобилям, рост экспорта автомобилей (на 22% в денежном выражении в 2016-2021 годы) и автомобильных компонентов (на 82%), а также положительная динамика по разработке и выведению на рынок новых продуктов, соответствующих современным глобальным технологическим тенденциям 5.

По задаче выведения на рынок продуктов с принципиально новыми свойствами (в области электродвижения, автономного вождения) удалось достичь значительного прогресса: в Российской Федерации развиваются проекты по всей цепочке создания стоимости - от добычи и обработки металлов и производства катодных и анодных материалов до производства тяговых батарей и электромобилей. Доля электромобилей в объеме автомобильного рынка в натуральном выражении по результатам 2021 года составила 1,1% (целевой уровень на 2021 год - 1,4%).

По задаче наращивания технологических компетенций национальных производителей автомобильной техники и комплектующих за счет углубления локализации производимых автомобилей до 70-85% (как доли стоимости компонентов, субкомпонентов и сырья, произведенных в Российской Федерации, в общей стоимости спецификации автомобиля, в денежном выражении) существует значительный потенциал для развития 5. Уровень локализации в 2019-2020 годах составлял 50-55%, в силу недостаточного объема инвестиций для динамичного развития производителей автокомпонентов в связи с ориентацией большинства автопроизводителей на крупнейших иностранных поставщиков автокомпонентов и отсутствия требований по локализации отдельных критически важных компонентов, систем безопасности и комфорта.

В настоящий момент производство электротранспорта в России в основном представлено общественным транспортом. Однако проекты ведущих

компаний показывают, что рынок вышел в зону экспериментов и в скором времени готов будет развернуть полномасштабные производственные программы по всей линейке транспорта, включая легковой 1. Проекты, реализованные в РФ, свидетельствуют о том, что при условии соответствующей государственной поддержки будет обеспечена конкурентоспособность отрасли производства электромобилей.

Аккумуляторная батарея является критическим компонентом электромобиля. Мировые производители, такие как BMW, Volkswagen и Tesla, обладают собственными технологическими цепочками производства, от сырья до конечного изделия 5. Для эффективного развития отрасли электромобилестроения необходима организация собственных технологических цепочек с приоритетом разработок и производства батарей на основе наиболее передовых катодных материалов с дифференциацией в зависимости от конкретных областей применения.

СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ПРОИЗВОДСТВА ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ МОДУЛЕЙ

Одним из крупнейших поставщиков батарей на основе катодного материала LFP (вид литий-ионных батарей с использованием LiFePO_4), в том числе для КАМАЗ, ГАЗ и Volgabus, является компания «Лиотех», входящая в структуры Роснано, которая обладает развернутыми объемами производства батарей для городского пассажирского транспорта около 0,1 ГВт·ч в год.

Интегратор РЭНЕРА, входящий в корпорацию «Росатом», обладает собственным центром НИОКР и занимается развитием и продвижением накопителей энергии для электротранспорта, обеспечивает сервисную поддержку своей продукции и предлагает ее не только в аренду, но и в лизинг и трейд-ин 5. В начале марта 2021 г. РЭНЕРА приобрел пакет акций южнокорейского производителя литий-ионных батарей Enertech International с обязательством по созданию в России производства литий-ионных ячеек и аккумуляторных батарей. Первая очередь завода должна заработать в 2025 г., а к 2030 г. его мощность должна составить не менее 2 ГВт·ч в год.

Корпорация «Ростех» ведет широкий спектр разработок в сфере электротранспорта. Разработки Ростеха применяются в электробусах ПАО «КАМАЗ» и электромотоциклах концерна «Калашников». Приоритетными материалами для создания аккумулятора, применяемого на электротранспорте, являются и будут являться в ближайшей перспективе материалы NMC (литий-никель-марганец-кобальт-оксидные аккумуляторы) с повышенным содержанием никеля.

Разработка масштабируемых технологий производства катодных материалов ведется на базе Сколтеха и МГУ им. М. В. Ломоносова 5. Производство современных катодных материалов NMC622 и NMC811 в России организовано лишь в небольших количествах (менее 1 т в год) в одном из стартапов Сколтеха (Рустор), оно покрывает часть ограниченного спроса мелких российских производителей. В Сколтехе и МФТИ развернуты опытные линии сборки ячеек литий-ионных аккумуляторов, имеются компетенции, необходимые для развертывания более масштабных производств на промышленной основе. Ресурсная база, требуемая для производства катодных материалов NMC, представлена в таблице 1.

Таблица 1

Ресурсная база для производства катодных материалов [1]

Компонент	USD/тонна в Китае	USD/тонна в России	Поставщик в России
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>
LiOH·H ₂ O	9000	10950	«Халмек», г. Тула, производитель
CoSO ₄ ·7H ₂ O	8116	9091	«Уральский завод химической промышленности», г. Верхняя Пышма, производитель
NiSO ₄ ·7H ₂ O	4770	4112	«Кыштымский медеэлектролитный завод», г. Кыштым, производитель
MnSO ₄ ·H ₂ O	864	671	ООО «Ноябрь», г. Москва не производится в РФ

Окончание табл. 1

1	2	3	4
FeSO ₄ · 7H ₂ O	90	195	«Ветлужский химический завод», г. Нижний Новгород, производитель
NaOH (98,5%)	350	400	«Завод минеральных порошков "Basis"», г. Верхний Уфалей, производитель
Na ₂ CO ₃ · 10H ₂ O H ₂ SO ₄ (95,6%) NH ₄ OH (25%)	300150	>150	ПАО «Химпром», г. Новочеркасск, производитель

Большая часть сырья, необходимого для производства катодных материалов, за исключением сульфата марганца, производится в России и доступна в ценовом диапазоне, сравнимом со средними ценами на китайском рынке. Производство ячеек литий-ионных аккумуляторов на основе NMC объемом 0,5 ГВт·ч в год потребует организации производства катодных материалов в объеме около 850 т в год.

В Российской Федерации имеются достаточные компетенции для конструирования тяговых батарей для электротранспортных средств, но в то же время отсутствует производство ячеек литий-ионных аккумуляторов с необходимой удельной энергией и в достаточном объеме 7.

Однако анализ показывает, что основными препятствиями развития отрасли электромобилестроения являются [3]:

- высокие стоимостные и массогабаритные показатели аккумуляторных батарей и невысокие удельные энергетические характеристики, обусловленные недостаточным уровнем развития технологий в области их создания;
- отсутствие развитой инфраструктуры станций для зарядки аккумуляторов и других накопителей энергии;
- длительное время зарядки аккумуляторных батарей (до 6-8 часов);
- ограниченный диапазон пробега транспортного средства между подзарядками;
- недостатки, обусловленные также ограниченным ресурсом аккумуляторных батарей, опасными для жизни напряжениями в системе

электропитания, отсутствием научно обоснованных последствий для окружающей среды при массовой утилизации.

Таким образом, в РФ необходимо создание производства батарей в качестве неотъемлемого элемента самой стратегии развития электротранспорта, рассмотрение возможной альтернативы – замена литий-ионных аккумуляторов — электрохимическими системами на основе натрия 1. Прототипы призматических ячеек натрий-ионных аккумуляторов емкостью 0,5–3 Ач созданы в Сколтехе и в МГУ им. М. В. Ломоносова, заложены основы масштабируемых технологий производства катодных и анодных материалов. Технология натрий-ионных аккумуляторов обещает примерно 30-процентное снижение стоимости запасенной энергии и не зависит от мировой конъюнктуры цен на литий, никель и кобальт, а также от их доступности. Натрий-ионные аккумуляторы построены на основе соединений ванадия, источником которых может быть «ЕВРАЗ» с годовым производством 7,5 тыс. т пятиоксида ванадия в г. Туле.

ПЕРСПЕКТИВЫ В СФЕРЕ ЭЛЕКТРОТРАНСПОРТА

В настоящее время подготовлен Минпромторгом проект Распоряжения Правительства РФ «Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года» (подготовлен 18.08.2022) 5.

Стратегия направлена на решение ключевых стратегических задач по созданию и производству конкурентоспособной продукции, удовлетворению спроса на продукцию отрасли со стороны потребителей Российской Федерации, создание современных сервисов мобильности, цифровых автомобильных сервисов и обновление парка автомобилей за счет развития научно-технологического и кадрового потенциала автопроизводителей и производителей автокомпонентов, реализации проектов в области локализации и развития производства компонентов и материалов, реализации мер, направленных на поддержку научно-исследовательских и опытно-

конструкторских работ, проводимых в целях инновационного развития отрасли, закрепления за российскими юридическими лицами прав на результаты интеллектуальной деятельности по созданию критически важных технологий в автомобильной промышленности, и обеспечения ее технологического суверенитета.

Реализация Стратегии обеспечит конкурентоспособность российской автомобильной промышленности и возможность экспорта технологий на глобальном уровне за счет создания производств инновационного транспорта - электрических и гибридных автомобилей, включая автомобили на водородных топливных элементах, автономных автомобилей. В частности, планируется появление линейки высоколокализованных электрических автомобилей со значительными темпами роста продаж (65-70% в год с достижением доли электротранспортных средств в размере 15% от совокупного объема автомобильного рынка в натуральном выражении к 2030 году), создание новых производств компонентов и материалов для электрического и гибридного транспорта с наращиваем их экспорта, включая тяговые батареи, ячейки к ним, катодные и анодные материалы, другие компоненты и материалы.

В качестве одного из ключевых механизмов наращивания производственного и научного потенциала предлагается углубление кооперации автомобильных компаний и поставщиков со смежными отраслями, консолидация усилий государства, автопроизводителей, химических, металлургических, информационно-телекоммуникационных компаний, научных, инжиниринговых и общественных организаций в целях освоения новых технологий и выведения на рынок продукции с новыми свойствами.

При разработке Стратегии учитывались следующие проблемы 5:

1. В период 2009-2021 годы произошло замещение импорта автомобилей на импорт автокомпонентов, что отрицательно повлияло на состояние отрасли в текущей ситуации;

2. Устаревание парка автотранспортных средств за счет недостаточных темпов его обновления.

3. Предпочтение автопроизводителями в Российской Федерации иностранных поставщиков с невысоким уровнем локализации.

4. Необходимость развития инфраструктуры для массового использования новых продуктов в области электротранспорта, автономного вождения, газомоторной техники.

Для обеспечения инновационного развития автомобилестроения в Российской Федерации необходимо 7:

- достижение технологического суверенитета по ключевым компонентам, сложным узлам и системам (автоматические коробки передач (АКП), системы двигателей, системы безопасности, компоненты и системы электрических автомобилей и др.);

- разработка автомобилей с перспективными видами силовой установки - электрические, гибридные автомобили, автомобили на водородных топливных элементах, и компонентов к ним;

- разработка технологий автономизации и роботизации транспортных средств, телематических транспортных систем, интеллектуальных систем безопасности и управления;

- повышение потребительских свойств и функций автомобилей путем освоения принципиально новых модульных платформ и электронных архитектур;

- улучшение энергоэффективности и повышение экологических показателей транспортных средств;

- применение новых технологий проектирования, моделирования и производства транспортных средств;

- организация гибких и адаптивных производственных технологий, использование технологий информатизации и компьютеризации производства электротранспорта;

- расширение применения новых конструкционных и эксплуатационных материалов, разработанных на территории РФ.

Таким образом, неотъемлемым условием и ключевым инструментом достижения технологического суверенитета автомобильной промышленности РФ, согласно Стратегии, является:

- организация отечественного производства и развитие необходимых отечественных технологий и материалов для производства автомобилей и компонентов (прежде всего, критических);

- использование интеллектуальной собственности российских производителей;

- поддержка выполнения на территории РФ полного цикла разработки компонентов российскими компаниями; развитие российской инженерной школы.

При этом без источников питания достаточной мощности реального прогресса в развитии отрасли электромобилестроения невозможно. Литий остается реальной базой для изготовления батарей, но много зависит от двух основных факторов. Во-первых, от его количества в недрах, добычи и переработки. Во-вторых, от технических возможностей предприятий-производителей источников питания.

В России необходимо срочно разворачивать прикладные технологические разработки и создавать производства тяговых аккумуляторов для электротранспорта, как минимум, по следующим причинам.

Во-первых, даже в нынешнем поколении аккумуляторов типа NMC622 и NMC811 существуют значительные возможности для совершенствования их характеристик 5. А следующие поколения (в том числе постлитиевые) не освоить без развертывания опытно-промышленной базы (опытных переналаживаемых линий по производству материалов и ячеек от 0,1 до 0,5 ГВтч) — такова специфика электрохимических технологий.

Во-вторых, в мире активно ведутся работы по низкотемпературным ЛИА (способным работать при минус 30°C и ниже). Наиболее критическим компонентом ЛИА, чувствительным к низким температурам, является электролит, а деградация аккумулятора главным образом происходит в

процессе низкотемпературного заряда. Поэтому в комплексе электромобиля проблема решается не только электрохимическими методами, но и на инженерном уровне, причем существующими технологиями: системами термостатирования аккумуляторов («термосов»), пассивным обогревом, активным обогревом (тепловыми насосами или постоянным/переменным током) при стоянке 7. Более того, около 70% населения России проживает в климатических поясах, в которых и нынешние технологии позволяют эксплуатировать электротранспорт. Адаптация электромобилей под специфику страны является отдельной актуальной технологической задачей на стыке электрохимии и современной инженерии.

В-третьих, по уточненным оценкам Международного энергетического агентства 2020 года, при сопоставимых условиях выбросы эквивалента CO₂ на 10-летнем жизненном цикле для электромобиля на батарее составляют 26,2 тонны, для автомобиля на водородных топливных элементах — 27,5 тонн, для автомобиля с ДВС — 34,3 тонны. Данные результаты свидетельствуют в пользу электромобилей, согласуются с другими авторитетными исследованиями и нашими собственными расчетами.

Можно отметить, что в России нормальная по мировым меркам структура источников генерации, даже с учетом отставания по новым ВИЭ (значительная доля природного газа, атомной энергии, гидроэлектростанций). Поэтому в российских условиях паритет по выбросам электромобиля и ДВС наступает уже на 4-тый год эксплуатации.

В-четвертых, действие эффекта экономии от масштаба существенно на объемах производства до 4—6ГВтч емкости ячеек в год, а далее оно нивелируется. При условии стратегического подхода к развитию отрасли, такая емкость соответствуют примерно 80—120 тыс. отечественных электрокаров в год, что на горизонте 2030 года для российского рынка является реалистичной целевой установкой (уровень продаж на внутреннем рынке за период 2010—2020 года составлял в среднем около 2 млн автомобилей в год, в том числе около 1,6 млн легковых автомобилей). Наконец, необходимо учитывать, что в

процессе проектирования современного электромобиля оптимизация осуществляется на всех уровнях системы — от материалов для ячеек батарей до организации сборочного пространства 7. А при высоком мировом спросе на аккумуляторные системы отечественные производители с малым объемом заказов будут обеспечиваться литий-ионными аккумуляторами по остаточному принципу.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Концепция по развитию производства и использования электрического автомобильного транспорта в Российской Федерации на период до 2030 года // Информационно-правовой портал Правительства РФ. URL: <http://static.government.ru/media/files/bW9wGZ2rDs3BkeZHf7ZsaxnlbJzQbJJt.pdf> (дата обращения: 22.11.2022).
2. Антонюк, А. В. Модернизация источников питания для электромобилей / А. В. Антонюк, В. А. Горюнова // Новые горизонты - 2019 : сборник материалов Белорусско-Китайского молодежного инновационного форума, Минск, 12–13 ноября 2019 г. / Белорусский национальный технический университет. – Минск : БНТУ, 2019. – С. 96-98. URL: <https://rep.bntu.by/bitstream/handle/data/73455/96-98.pdf?sequence=1&isAllowed=y> (дата обращения: 22.11.2022).
3. Трескова, Ю. В. Электромобили и экология. Перспективы использования электромобилей / Ю. В. Трескова. — Текст: непосредственный // Молодой ученый. — 2016. — № 12 (116). — С. 563-565. — URL: <https://moluch.ru/archive/116/31697/> (дата обращения: 22.11.2022).
4. Что такое электрокар и каким он может быть // Портал «Электрокары» URL: <https://1electrocar.ru/princip/elektrokar.html> (дата обращения: 22.11.2022).
5. Семикашев В.В. и др. Стратегия электромобилизации России: электронный ресурс // Семикашев В.В., Яковлев А.А., Ростовский Й.К. Материалы III конференции ИМП РАН и ИЭОПП СО РАН, 24-26 марта 2021 г. URL: <https://ecfor.ru/wp-content/uploads/2022/01/strategiya-elektromobilizatsii-rossii.pdf?ysclid=law7bz6og0107642997> (дата обращения: 22.11.2022).
6. Амангалиев Ерлан Зингалеевич, Сарваров Анвар Сабулханович, Косматов Валерий Иванович, Петушков Михаил Юрьевич, Омельченко Евгений Яковлевич ЭЛЕКТРОМОБИЛЬНЫЙ И ГИБРИДНЫЙ ТРАНСПОРТ: СИЛОВЫЕ СХЕМЫ, ОБОРУДОВАНИЕ, ПРОБЛЕМЫ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ // ЭС и К. 2022. №1 (54). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/elektromobilnyy-i-gibridnyy-transport-silovye-shemy-oborudovanie-problemy-i-perspektivy-razvitiya> (дата обращения: 22.11.2022).
7. Проект Распоряжения Правительства РФ "Об утверждении Стратегии развития автомобильной промышленности Российской Федерации до 2035 года" (подготовлен Минпромторгом России 18.08.2022): электронный текст // Информационно-правовой портал Гарант.ру. URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/56830546/?ysclid=law75oxmd966496034> (дата обращения: 22.11.2022).

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОТЫ МНОГОПУЛЬСНЫХ ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ НА НАГРУЗКУ, ВКЛЮЧАЮЩУЮ ЕМКОСТНЫЕ ФИЛЬТРЫ

Аннотация: В статье произведено исследование работы источников питания постоянного тока на базе трансформаторно-выпрямительных устройств (ТВУ), нагруженных на активную нагрузку при наличии емкостных фильтров и с учетом реальных параметров элементов ТВУ. Рассмотрены варианты ТВУ с различными пульсностями схемы выпрямления. Приведены основные энергетические показатели, используемые для оценки эффективности работы исследуемых источников питания. По результатам компьютерного моделирования получены осциллограммы работы преобразователей с мостовыми выпрямителями при наличии и отсутствии емкостных фильтров, а также произведен расчет рассмотренных энергетических показателей на примере 12-пульсного ТВУ. Рассмотрено влияние емкости фильтра на характеристики работы источника питания.

Ключевые слова: выпрямитель, трансформатор, источник питания, постоянный ток.

ВВЕДЕНИЕ

Широкое распространение ТВУ для получения постоянного тока в различных сферах обуславливает актуальность решения задачи улучшения электромагнитной совместимости полупроводниковых преобразователей (входящих в состав ТВУ) с сетью и нагрузкой, которая связана с отрицательным обратным влиянием таких преобразователей на питающую сеть с другими потребителями, а также со снижением качества электрической энергии на нагрузке с возникновением пульсаций выходного тока и/или выходного напряжения ТВУ.

В настоящее время рассматриваемые источники питания применяются в широком диапазоне мощностей, включая маломощные бытовые устройства (при мощностях нагрузок в десятки-сотни Вт), использующие однофазные выпрямители, и мощные преобразователи для промышленных технологических установок (при токах в сотни кА). Уровни выходных напряжений, которые могут быть достигнуты в таких ТВУ, обуславливаются областью применения и составляют от десятков Вольт до десятков кВ.

На рис. 1 приведен пример структурной схемы системы электроснабжения летательных аппаратов переменным и постоянным током [1].

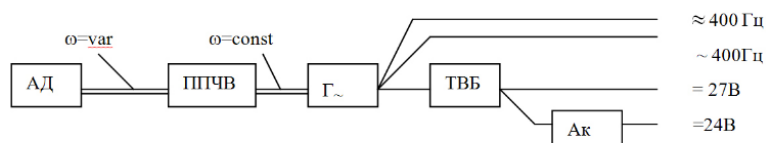


Рис. 1. Структурная схема системы электроснабжения летательного аппарата

Подобные системы электроснабжения реализуются, например, в отечественных гражданских самолетах Ан-124, Ту-204 и др. В таких системах, как видно из рис. 1, используются генераторы переменного тока (высокооборотные), вырабатывающие переменное напряжение с частотой 400 Гц, которое используется для питания бортовых потребителей, а также подается на ТВУ, обеспечивающие получение постоянного (выпрямленного) напряжения 27 В.

Отметим, что в настоящее время в рамках реализации концепций «более электрического самолета» и «полностью электрического самолета» расширяется разработка и применение систем электроснабжения летательных аппаратов напряжением 270 В постоянного тока, требования к которым для отечественных устройств регулируются ГОСТ Р 54073-2017 [2]. На рис. 2 показан пример системы электроснабжения зарубежных гражданских самолетов *Boeing-787* и *Airbus-350* [3].

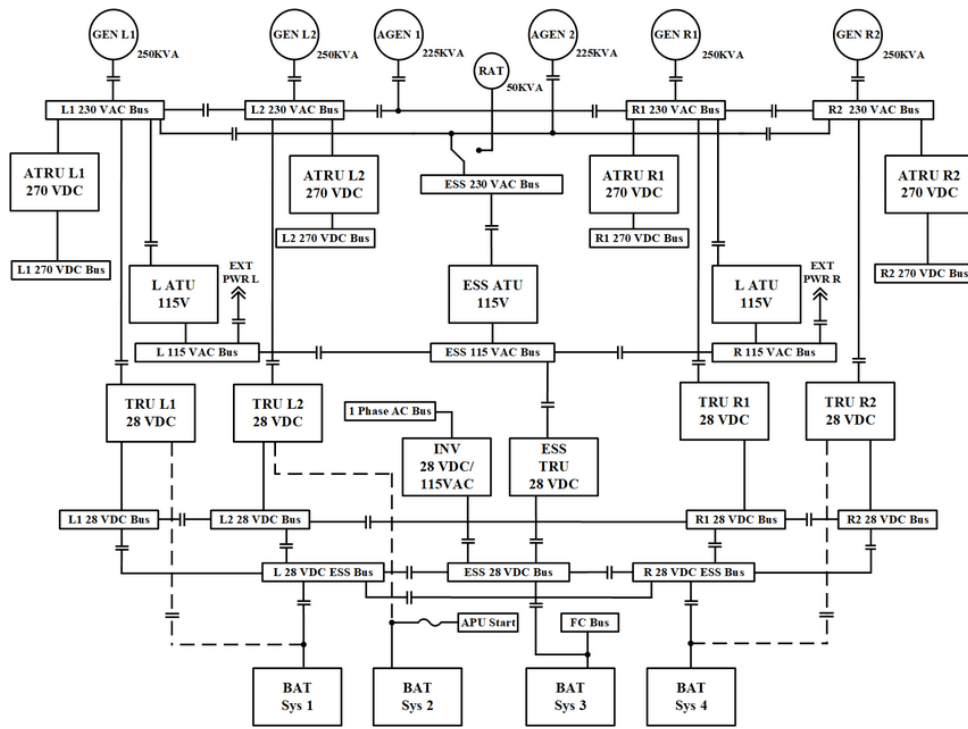


Рис. 2. Структурная схема системы электроснабжения самолетов *Boeing-787* и *Airbus-350*

Электроснабжение постоянным током широко используется в электротранспорте, электроподвижных составах. На рис. 3 показана структурная схема электроснабжения электроподвижного состава постоянного тока [4]. Такая система используется при напряжениях тяговой сети 0,66, 3, 24 кВ. Как видно из рис. 3, напряжение тяговой сети после его фильтрации подается на инверторы, которые в свою очередь питают тяговые электродвигатели переменного тока, которые обладают известными преимуществами, по сравнению с тяговым электроприводом постоянного тока.

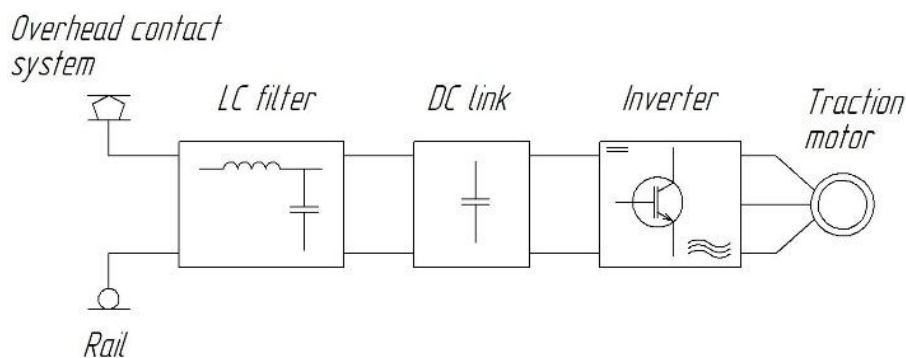


Рис. 3. Структурная схема системы электроснабжения электроподвижного состава

В отмеченных областях применяемые ТВУ малой и большой мощности в основном используются на базе мостовых выпрямителей, которые питаются при помощи выпрямительных трансформаторов или автотрансформаторов. В случае трансформаторов могут использоваться несколько вторичных обмоток одного трансформатора, соединенных в звезду, треугольник, зигзаг, фазосдвинутый треугольник и т.д. При этом в авиации расширяется использование автотрансформаторных преобразователей ввиду их значительно меньшей установленной мощности, по сравнению с выпрямительными трансформаторами.

ОСНОВНЫЕ ПОКАЗАТЕЛИ ТВУ

Для получения преобразователей большой мощности выпрямительные мосты в ТВУ соединяются по выходу последовательно или параллельно. Это позволяет получать высокие выходные напряжения (в первом случае) или высокие выходные токи (во втором случае) для питания заданных нагрузок. На рис. 4 показана принципиальная схема 12-пульсного выпрямителя, который используется в вышеотмеченных областях [5]. На данном рисунке показан вариант с параллельным соединением мостов, который применяется в системах электроснабжения самолетов напряжением 27 В постоянного тока. В этом случае для выравнивания мгновенных значений напряжений параллельно соединенных мостов используется уравнивательный дроссель (УД).

Для повышения качества работы и электромагнитной совместимости ТВУ с сетью и нагрузкой используются 18-пульсные ТВУ (рис. 5) [6]. При этом рациональной конфигурации источника питания при применении параллельного соединения мостов имеется возможность исключения необходимости применения УД, как видно из рис. 5.

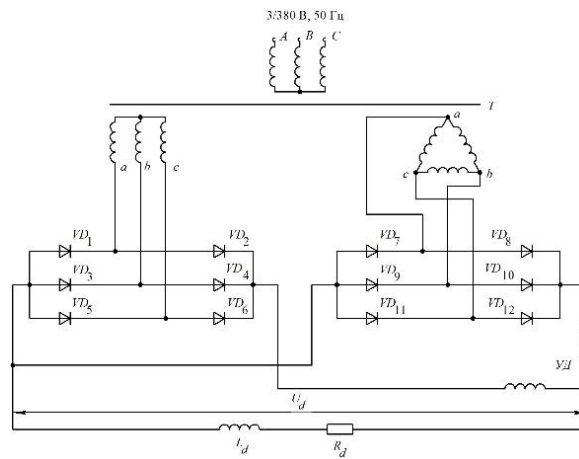


Рис. 4. 12-пульсное ТВУ

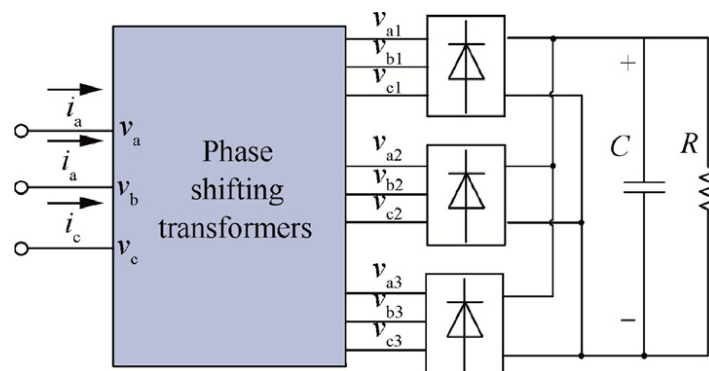


Рис. 5. 18-пульсное ТВУ

В теории силовой электроники для оценки качества работы показанных и других аналогичных ТВУ используется комплекс энергетических показателей, определяющих качество преобразования энергии в ТВУ и их влияние на сеть, нагрузку и других потребителей, питающихся от такой сети. В статье оценка качества работы ТВУ будет производиться на базе следующих параметров [7]:

1. Коэффициент гармоник потребляемого ТВУ тока:

$$k_{rI} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1}, \quad (1)$$

где I_n – действующие значения гармоник с номером n , А; I_1 – действующее значение первой гармоники тока, А.

2. Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения по первой высшей гармонике:

$$k_{nv} = \frac{U_{mn}}{U_d}, \quad (2)$$

где U_{mn} – амплитуда n -гармоники выходного напряжения ТВУ, В; U_d – среднее значение выходного напряжения ТВУ, В.

Кроме того, рассмотрим параметр – пульсность схемы выпрямления: $p = q \cdot m2$, где q – число используемых полупериодов питающего напряжения сети; $m2$ – число вторичных фаз выпрямительного трансформатора.

На рис. 5 показан вариант улучшения качества выходного напряжения и выходного тока ТВУ, работающего на активную нагрузку, в виде подключения нагрузки через емкостный фильтр. Это позволяет при некотором искажении формы токов вентилях (а также формы токов обмоток трансформатора и формы суммарного потребляемого тока) снизить пульсации выходного напряжения ТВУ.

Подбор требуемой величины емкости фильтра для заданной мощности нагрузки выпрямителя P_d может быть произведен по [7] в зависимости от пульсности p в соответствии с формулой:

$$C_d \gg \frac{1}{p} \cdot \frac{P_d}{f_1 \cdot U_d^2}, \quad (3)$$

где f_1 – частота питания выпрямителя, Гц.

МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ ТВУ С ЕМКОСТНЫМ ФИЛЬТРОМ

Для моделирования работы ТВУ с емкостным фильтром эффективно использовать программный комплекс *Matlab* с применением библиотек *Simulink* и *Simscape*. Моделирование было произведено для вариантов ТВУ с показателями $p = 6$, $p = 12$ (два выпрямительных моста, соединенных параллельно), $p = 18$ (три выпрямительных моста, соединенных параллельно).

На рис. 6-8 приведены осциллограммы выпрямленного напряжения ТВУ и потребляемого трансформатором тока для случая ТВУ с $p = 6$.

При моделировании принимались следующие параметры системы: напряжение питания $U_1 = 200$ В, частота 400 Гц, емкость фильтра $C = 500$ мкФ, сопротивление нагрузки $R_d = 2$ Ом.

На рис. 9-11 показаны аналогичные осциллограммы, полученные при моделировании ТВУ с $p = 12$, а на рис. 12-14 – для ТВУ с $p = 18$.

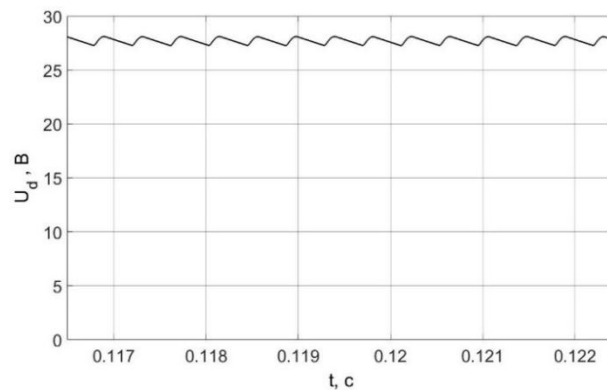


Рис. 6. Выпрямленное напряжение 6-пульсного выпрямителя с фильтром

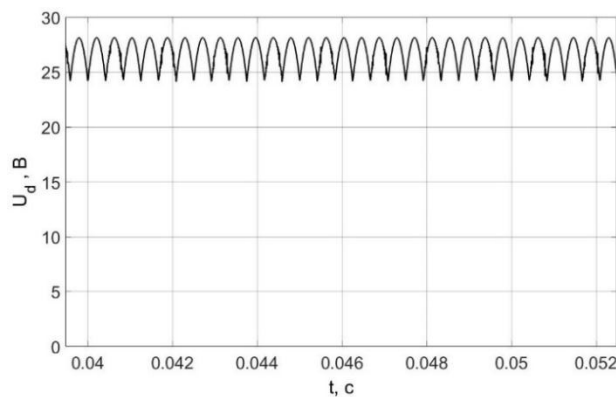


Рис. 7. Выпрямленное напряжение 6-пульсного выпрямителя без фильтра

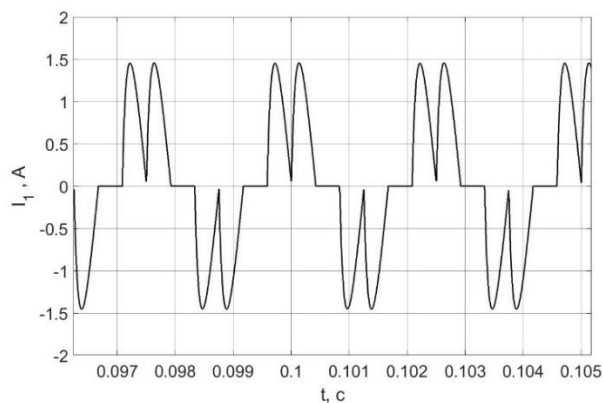


Рис. 8. Потребляемый ток ($p = 6$)

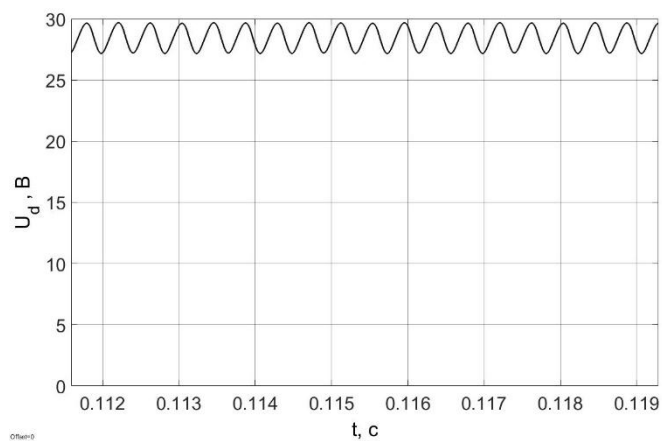


Рис. 9. Выпрямленное напряжение 12-пульсного выпрямителя с фильтром

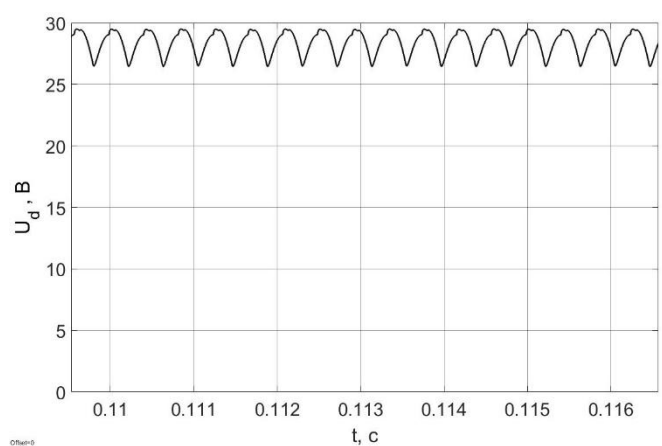


Рис. 10. Выпрямленное напряжение 12-пульсного выпрямителя без фильтра

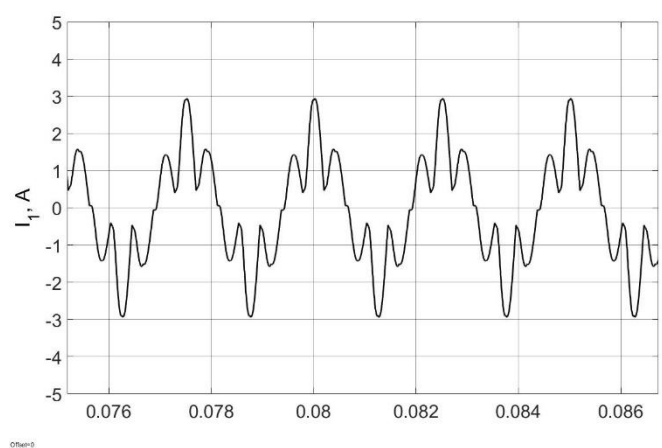


Рис. 11. Потребляемый ток ($p = 12$)

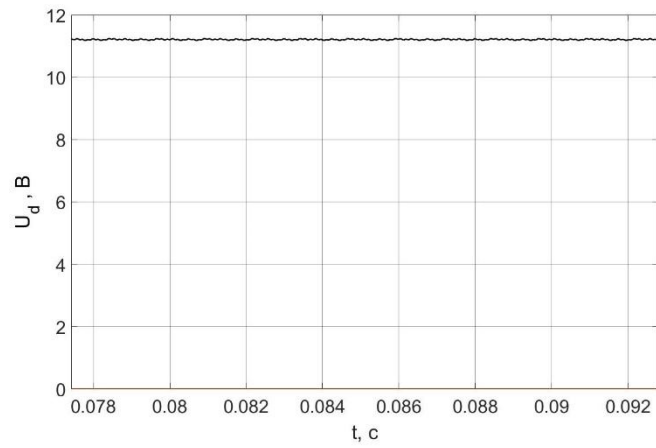


Рис. 12. Выпрямленное напряжение 18-пульсного выпрямителя с фильтром

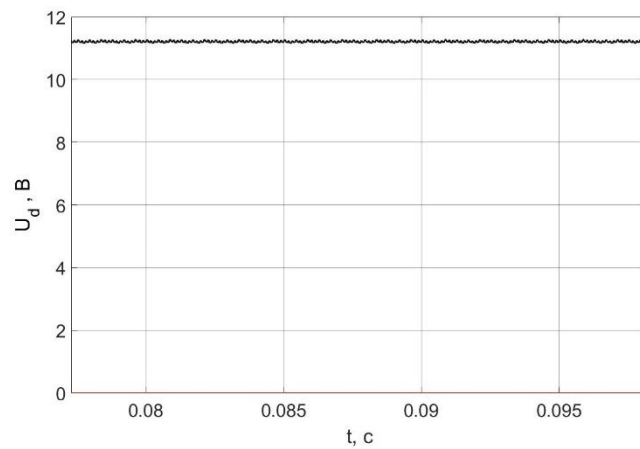


Рис. 13. Выпрямленное напряжение 18-пульсного выпрямителя без фильтра

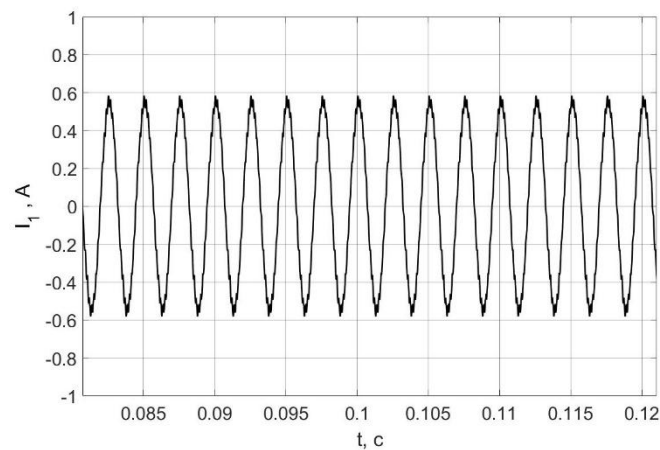


Рис. 14. Потребляемый ток ($p = 18$)

Рис. 6-8 отражают влияние наличия емкостного фильтра на работу 6-пульсных мостовых выпрямителей при учете реальных параметров питающего трансформатора и параметров вентилей выпрямителя. Как видно,

при наличии фильтра пульсации выпрямленного напряжения значительно снижаются, а потребляемый ТВУ ток имеет импульсную форму.

В случае 12-пульсного выпрямителя принимались аналогичные параметры системы: $U_1 = 200$ В, частота 400 Гц, емкость фильтра $C = 500$ мкФ, сопротивление нагрузки $R_d = 2$ Ом. Для 18-пульсного выпрямителя принимались следующие параметры: $U_1 = 115$ В, частота 400 Гц, емкость фильтра $C = 500$ мкФ, сопротивление нагрузки $R_d = 2$ Ом.

РАСЧЕТ ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ ПОКАЗАТЕЛЕЙ И ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТВУ

По результатам моделирования в виде осциллограмм токов и напряжений элементов ТВУ были произведены расчеты энергетических показателей качества их работы на примере 12-пульсного ТВУ с параллельным соединением мостов и наличием УД при отсутствии емкостного фильтра и при его наличии.

Коэффициент гармоник потребляемого трансформатором тока для 12-пульсного выпрямителя без фильтра и с фильтром соответственно:

$$\begin{aligned}
 k_{rI} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \\
 &= \frac{\sqrt{0,177^2 + 0,092^2 + 0,049^2 + \\
 &\quad + 0,035^2 + 0,042^2 + 0,035^2 + \dots}}{1,307} = 0,171,
 \end{aligned} \tag{4}$$

$$\begin{aligned}
 k_{rI} &= \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} = \\
 &= \frac{\sqrt{0,537^2 + 0,325^2 + 0,021^2 + \\
 &\quad + 0,078^2 + 0,021^2 + 0,007^2 + \dots}}{1,327} = 0,479.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения 12-пульсного выпрямителя без фильтра и с фильтром:

$$k_{uv} = \frac{U_{mn}}{U_d} = \frac{1,29}{28,37} = 0,0455, \tag{6}$$

$$k_{iv} = \frac{U_{mn}}{U_d} = \frac{1,22}{28,45} = 0,0429. \quad (7)$$

Как известно, при эксплуатации 12-пульсного выпрямителя с параллельным соединением мостов для выравнивания мгновенных значений выходных напряжений параллельно соединенных мостов используется УД, показанный на рис. 4 с требуемой величиной индуктивности. При проведении моделирования величина индуктивности каждой полуобмотки дросселя составляла 0,01 мГн. При этом за счет влияния емкостного фильтра при такой величине индуктивности дросселя удалось добиться улучшения коэффициента пульсаций выпрямленного напряжения на 6% при соответствующем изменении формы токов в обмотках выпрямительного трансформатора и формы потребляемого тока ТВУ, что видно из величин рассчитанных коэффициентов гармоник потребляемых токов.

В случае применения 18-пульсного ТВУ емкостный фильтр также позволяет улучшить качество выпрямленного напряжения со снижением амплитуды пульсаций, что видно из рис. 12, 13. При снятии осциллограмм на рис. 12, 13 величина индуктивности частей обмоток УД, подключаемых к соответствующим выводам выпрямительных мостов, составляла 0,001 мГн. Форма тока, потребляемого ТВУ, в случае наличия емкостного фильтра остается близкой к синусоиде, как видно из рис. 14. Обеспечение более близкой к синусоиде формы потребляемого тока, в том числе при параллельно соединенных мостах и работе на активно-емкостную нагрузку, является преимуществом 18-пульсных ТВУ по сравнению с 12-пульсными (рис. 11).

Таким образом, из приведенных осциллограмм и расчетов видно влияние наличия емкостного фильтра на работу ТВУ. Применение емкостного фильтра позволяет снизить требуемую величину индуктивности УД (при параллельном соединении выпрямительных мостов) при сохранении необходимых показателей качества электрической энергии на выходе ТВУ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. А.Н. Коптев, *Авиационное и радиотехническое оборудование. Часть 1 Электрооборудование воздушных судов гражданской авиации*, Самара: Изд-во Самар. гос. аэрокосм. ун-та, 2011. 257 с.
2. ГОСТ Р 54073-2017 *Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии*. М., 2018. 39 с.
3. А. Chekin, Ya. Moroshkin, K. Gubernatorov and M. Kiselev, "Impact of reliability of state-of-the-art electrical units on architecture of power supply system of modern aircraft," in *Proc. International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Ufa, Russia, Oct. 21–25, 2019, pp. 1–7.
4. L. Roginskaya, A. Gorbunov and A. Mednov, "Installed Power of Transformers for Equivalent Multiphase Rectification Circuits," in *Proc. International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Ufa, Russia, Oct. 21–25, 2019, pp. 1–7.
5. Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. *Силовая электроника*. М.: Издательский дом МЭИ, 2016. 632 с.
6. T. Yang, S. Bozhko, P. Wheeler, S. Wang and S. Wu, "Generic functional modelling of multi-pulse auto-transformer rectifier units for more-electric aircraft applications," *Chinese Journal of Aeronautics*, Volume 31, Issue 5, May 2018, pp. 883–891.
7. Г.С. Зиновьев. *Силовая электроника*. 5-е изд., испр. и доп. М.: Юрайт, 2015. 667 с.

Грахов П. А., Федин А. В., Ясовеев В. Х.
Уфимский университет науки и технологий

ДВУХЭЛЕМЕНТНЫЕ УСТРОЙСТВА УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ НА ОСНОВЕ ИЗГИБНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ МАГНИТОСТРИКЦИОННЫХ ПЛАСТИН

Аннотация: В публикации представлены результаты исследований исполнительных устройств угловых перемещений с изгибным типом деформации активного элемента - магнитоотрицательной двухслойной пластины. Рассмотрена методика разработки магнитоотрицательного исполнительного устройства на основе двухэлементной схемы и с возможностью коррекции статических характеристик при действии предварительных упругих напряжений вызванных моментами внешних и внутренних сил, с учетом моментов возникающих при изменении температуры пластины, выполненной из материалов с различными значениями температурных коэффициентов линейного расширения.

Ключевые слова: многоэлементные исполнительные устройства, магнитоотрицательная пластина; угловые перемещения; упругие предварительные напряжения; моменты внешних и внутренних сил; температурный коэффициент линейного расширения.

ВВЕДЕНИЕ

Развитие техники и технологий выдвигает комплекс задач, связанных с повышением эффективности современного промышленного и научного оборудования, в частности, с совершенствованием исполнительных органов,

способных с достаточным быстродействием осуществлять угловое позиционирование объектов в диапазоне долей градуса и угловых минут.

Исполнительные устройства (ИУ), в том числе и угловых перемещений могут быть реализованы, например, на основе изгибных деформаций двухслойной магнитострикционной пластины (МП) с неоднородными в слоях свойствами [1]-[3].

ИУ на основе МП находят применение в качестве элементов измерительных систем, в схемах испытания новых тонких листовых структур и т.п. [4]. В качестве актуатора [5] магнитострикционные исполнительные устройства (МСИУ) позволяют эффективно осуществлять позиционирование объектов в диапазоне десятков угловых минут с приемлемым быстродействием в различных условиях эксплуатации (при заметных изменениях механических напряжений, нагрузок, температуры).

Исследования МСИУ с изгибным типом деформации активного элемента выявили целесообразность развития новых технических решений в направлении применения многоэлементных конструктивных схем, что позволило предложить ряд оригинальных многоэлементных конструкций устройств угловых перемещений на основе многослойных МП, и методов управления ими, с улучшенными эксплуатационными характеристиками.

Характерными особенностями МСИУ, в том числе и изгибного действия, являются:

- четный режим отработки перемещений (необходимость подмагничивания, увеличение энергопотребления и дополнительное повышение температуры биметалла МП);

- невысокая точность отработки углового перемещения φ по причине наличия при изменении температуры $\square\square^\circ$ нежелательных биметаллических изгибных деформаций МП и угловых перемещений $\varphi\square\square^\circ$ позиционируемого объекта

Наблюдается также температурная коррекция зависимостей углового перемещения φ от управляющего воздействия тока I в намагничивающей

катушке МСИУ. В следствие различия значений температурных коэффициентов линейного расширения (ТКЛР) материалов слоев МП, при изменении ее температуры, появляется внутренний момент термомеханических сил $M_{\square\square^\circ}$, знак которого определяется соотношением значений ТКЛР материалов слоев МП \square_2 и \square_1 , и статические характеристики $\varphi(l)$ дополнительно корректируются [6] снижением перемещений.

При выборе материалов слоев МП с равными значениях ТКЛР, но с более низкими значениями магнитострикции насыщения λ_{si} , снижается максимально возможный диапазон перемещений.

Эти факторы дополнительно определяют целесообразность разработки новых, для повышения эффективности МСИУ, в том числе и за счет применения многоэлементных конструктивных схем.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Выбор конструкции и разработка ИУ, в том числе и МСИУ угловых перемещений, осуществляется на основании выдвигаемых системой управления требований к диапазону угловых перемещений $\Delta\varphi$ и быстродействию (с учетом параметров инерционности и жесткости упругой нагрузки), к возможности изменения знака перемещений исполнительного органа, предельно допустимых габаритов, рабочему диапазону температур, допустимым значениям энергопотребления и т. п.

На первом этапе разработки по заданному рабочему диапазону температур оцениваются возможные нежелательные термомеханические перемещения нагрузки $\Delta\varphi\Theta$, целесообразность выбора конструктивной схемы с возможностью их компенсации, анализируется есть ли необходимость в обеспечении позиционирования объектов в нечетном режиме, с разным знаком перемещения относительно исходного положения.

При положительном ответе техническое решение состоит в выборе многоэлементного варианта построения МСИУ, например, двухэлементной конструктивной схемы с отдельным намагничиванием МП [5].

Далее следуют традиционные шаги: подбор активных материалов, предварительно определяются габариты активного элемента по требуемым значениям диапазона угловых перемещений $\Delta\varphi$ и быстродействия, параметры магнитных систем и т. д.

Оценивая требуемые значения точности, стабильности характеристик к изменению температуры МП, потребления энергии во многих случаях методику разработки следует дополнить этапами улучшения эксплуатационных свойств за счет коррекции характеристик на основе возможности воздействия на активный элемент (МП) МСИУ внутренних и внешних моментов сил [7].

На основе разработанного математического описания [8], для оценки достижения требуемой эффективности, рассчитываются статические и динамические характеристики новых конструкций и уточняются параметры МСИУ.

Предлагаемые этапы разработки МСИУ позволяют реализовать улучшение эксплуатационных свойств ИУ с помощью создания соответствующих предварительных распределений упругих напряжений по толщине активных слоев МП. Например, введение предварительного внутреннего момента, направленного встречно моменту магнитострикционных сил $M_{мс}$ [7] повышает стабильность статических характеристик $\varphi(I)$ к изменению температуры МП. Наличие дополнительного внешнего встречно направленного момента определенной величины, приводит к выигрышу в перемещении до значений φ_S (диапазон перемещений исходного, не подвергнутого действию предварительных моментов МСИУ) уже в области средних значений управляющего воздействия. Этот результат можно оценивать, как снижение энергопотребления за счет применения в работе МСИУ меньших значений управляющих воздействий тока.

Рассмотрим в логике изложенного двухэлементную конструкцию МСИУ угловых перемещений с отдельным намагничиванием (с помощью двух обмоток с числом витков w каждая) в схеме которого (рисунок 1) используются

две одинаковые двухслойные МП, расположенные параллельно одна над другой [9].

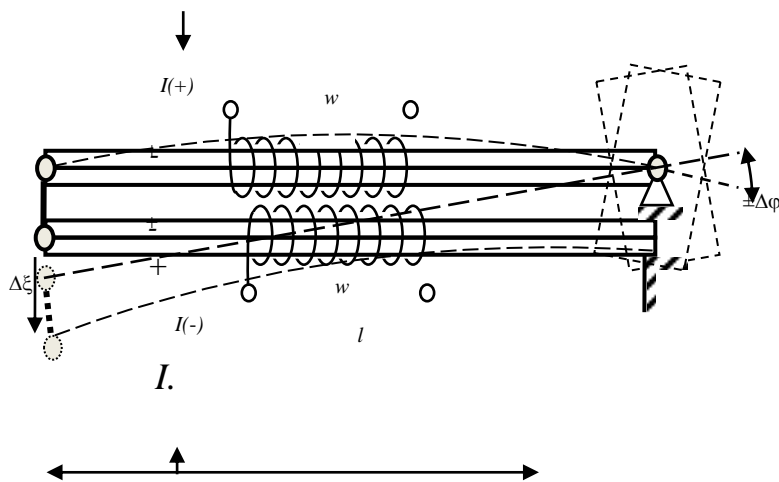


Рис. 1. Двухэлементный МСИУ

В отношении углового движения перемещаемого объекта МП включены последовательно: нижняя МП правым концом закреплена на основании, а верхняя, также правым концом, жестко связана с нагрузкой и поворотной частью закрепленного на основании правого шарнира.

Пространство для укладки обмоток отдельных электромагнитных систем образованием за счет подвижного псевдо«шарнира» с увеличенным вертикальным звеном, соединяющим левые концы МП, перемещаемым объектом смещен вверх на размер вертикального звена.

В работе предложенное схемное решение МСИУ характеризуется компенсацией угловых перемещений $\Delta\varphi\Theta$ нагрузки, поскольку обе пластины деформируются одинаково при изменении температуры, не вызывая углового движения перемещаемого объекта.

Нечетные угловые перемещения объекта от исходного положения осуществляются в диапазоне $\pm\Delta\varphi \approx 0,75(|\lambda_1|+|\lambda_2|)l/ZП$ отдельной подачей управляющего тока в обмотки МП.

В первом приближении быстродействие определяет собственная частота f_c механической системы ИУ-нагрузка. При кратности отношения моментов инерции нагрузки J_H и активного элемента $J_{ИУ}$ более двух и отсутствии

упругой нагрузки, МСИУ по динамическим свойствам близок к системам с сосредоточенными параметрами и $f_c \approx (K_{\text{фИУ}}/J_H)^{1/2}/2\pi$.

Жесткость активного элемента оценочно определяется как: $K_{\text{фИУ}} \approx E \Delta b Z_{\text{П}}^3 / 6l^3$, где $l^3 = nl$, а l , b , $Z_{\text{П}}$, $E \Delta$ – длина, ширина, толщина МП и эквивалентный модуль упругости материалов слоев соответственно, n в последовательной схеме равно 2.

В логике методики проектирования диапазон перемещений $\Delta\varphi$ и быстродействие, а следовательно момент инерции нагрузки J_H и жесткость активного (двухкомпонентного) элемента МП $K_{\text{фИУ}}$ позволяют, с учетом констант магнитострикционных материалов МП предварительно выбрать габаритные параметры активного элемента МСИУ.

По заданному диапазону угловых перемещений $\Delta\varphi$ и константам материалов МП рассчитывается ориентировочное значение характерного геометрического параметра L^* (отношение $l/Z_{\text{П}}$).

По заданному значению $T_{\text{пп}}$ (с учетом возможности коррекции динамических свойств ИУ, время завершения переходных процессов определяется как $T_{\text{пп}} \approx 1/f_c$) и инерционности нагрузки J_H рассчитывается значение требуемой жесткости активного элемента $K_{\text{фИУ}}$.

Опираясь на полученные параметры L^* и $K_{\text{фИУ}}$ определяют необходимые габаритные размеры МП МСИУ l , b и $Z_{\text{П}}$.

Формальный критерий эффективности ИУ $F = \Delta\varphi \cdot f_c = C(lbZ_{\text{П}}/J_H)^{1/2}$ пропорциональный корню квадратному из объема активного материала МП отнесенному к моменту инерции нагрузки J_H , также позволяет оценивать варианты МСИУ для углового позиционирования инерционных объектов.

В следствии различия значений ТКЛР материалов слоев МП, при изменении температуры МП ΔT появляется внутренний момент сил, знак которого определяется соотношением ТКЛР материалов слоев МП α_2 и α_1 . По этой причине статические характеристики $\varphi(I)$ дополнительно корректируются снижением.

С целью достижения температурной стабильности характеристик МСИУ возможно применение наведенных предварительных внутренних моментов, направленных встречно моменту магнотстрикционных сил [6].

Введение наряду с предварительным внутренним моментом, внешнего встречно направленного момента определенной величины, приводит к дополнительному выигрышу в диапазоне перемещений до значений φS (диапазон перемещений исходного, не подвергнутого действию предварительных моментов МСИУ) уже в области средних значений управляющего воздействия [7].

Это можно интерпретировать как снижением энергопотребления за счет применения в работе МСИУ меньших значений управляющего воздействия.

Применение такого подхода предполагает возможность построения более эффективных по энергопотреблению устройств, с характеристиками стабильными к изменению температуры и позволяет реализовать повышение эксплуатационных характеристик предложенного конструктивного решения МСИУ.

В устройстве (рисунок 2), построенному аналогично МСИУ по рисунку 1, состоящем из двух МП, обе двухслойные пластины предварительно собираются с прогибом в сторону сжатия активного слоя с положительной магнотстрикцией (см. рисунок 2, красная линия пунктиром), либо с прогибом в сторону растяжения слоя с отрицательной магнотстрикцией.

При этом создается предварительный внутренний момент направленный встречно моменту магнотстрикционных сил.

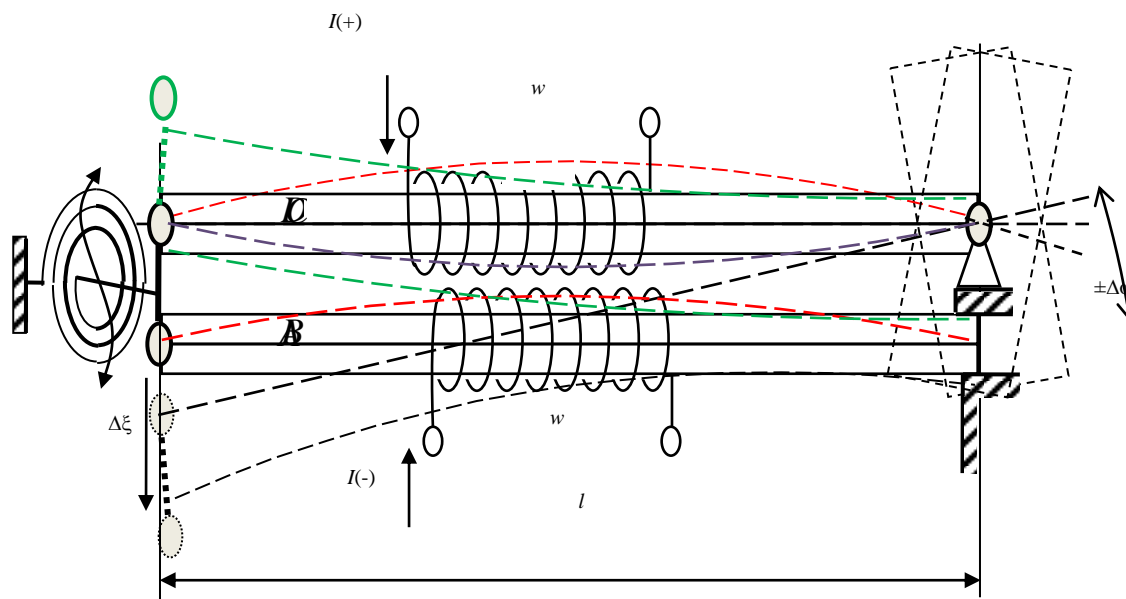


Рис. 2. МСИУ со стабильными к температуре характеристиками и эффективным энергопотреблением

В нашем случае нижний слой каждой МП выполнен из материала с положительной магнитострикцией. Верхний (по рисунку 2) слой из выполнен из материала с отрицательной магнитострикцией или используется пассивный, не магнитострикционный материал, который имеет меньшее, чем у материала верхнего слоя значение ТКЛР ($\alpha_1 > \alpha_2$).

Величину температуры сборки МП $\theta_{\text{сб}} \text{ Ммс}$ для задания предварительного внутреннего момента определяют с учетом условия $\lambda S \approx (\alpha_1 - \alpha_2) \cdot \theta_{\text{сб}} \text{ Ммс}$, где λS магнитострикция насыщения материала активного слоя МП. □

Значение предварительного, встречно направленного, внутреннего момента $M_{\text{внут}}$ следует выбирать в соотношении: $M_{\text{внут}} \approx (-0,5 \div -1,0) \text{ Ммс}$.

Пружинный элемент (может быть линейным и регулируемым), с существенно меньшей (на порядок и более) жесткостью по сравнению МП, предварительный изгибающий момент внешних сил M_c , направленный встречно моменту магнитострикционных сил $M_{\text{мс}}$, (рисунок 2, зеленая

пунктирная кривая) также предварительно сжимающий верхние слои обеих МП.

Значение дополнительного внешнего встречно направленного момента, для достижения снижением энергопотребления необходимо подбирать так, чтобы, сумма упругих напряжений на внешней поверхности МП была близка к нулю и происходила взаимная компенсация упругих напряжений на внешней плоскости активного слоя МП $\sigma_{max\text{ мс}} \approx \sigma_{max\text{ Мс}}$, где: $\sigma_{max\text{ мс}}$ - максимальное магнитоэластическое упругое напряжение.

Получены статические характеристики $\varphi(I)$ двухэлементных МСИУ угловых перемещений с отдельным намагничиванием МП.

Характеристики определены для МСИУ построенных на основе МП с характерным геометрическим размером $l/ZП$ равным 50 и шириной $b=0,01\text{ м}$ и с одним активным слоем из магнитоэластического сплава 49К2Ф для нагрузочного режима $JH = 2\text{ ЛИУ}$.

На рисунке 3 приведена выходная характеристика МСИУ нечетного вида по рисунку 1 (внешний момент M_c равен нулю - обозначена синим цветом).

Зависимости $\varphi(I)$ двухэлементного МСИУ по рисунку 2 дополнительно скорректированы (на рисунке 3 пунктирная кривая желтого цвета) за счет действия внешнего встречно направленного магнитоэластическому моменту M_c величиной $0,1\text{ Н*м}$.

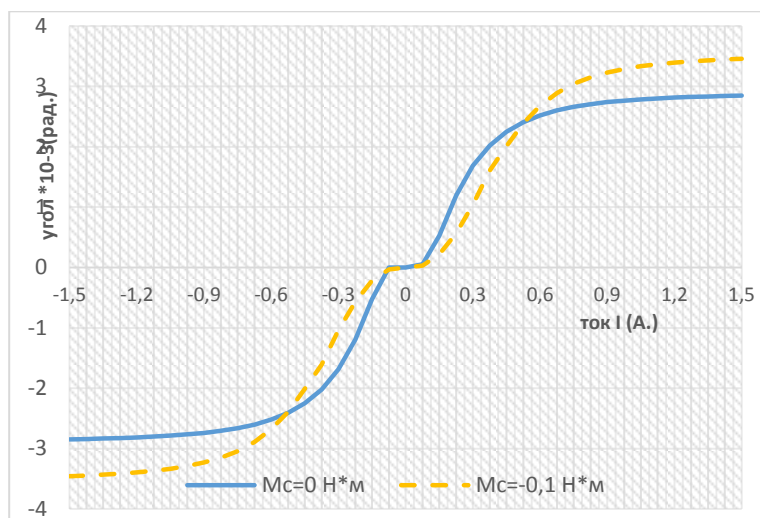


Рис. 3. Статические характеристики $\varphi(I)$ двухэлементных МСИУ угловых перемещений с отдельным намагничиванием МП

Сравнительный анализ характеристик показывает, что применение в схеме двухэлементного МСИУ действия предварительного внешнего момента направленного встречно моменту магнестрикционных сил позволяет практически более чем в 2,5 раза снизить значение управляющего воздействия тока для достижения значений φ_S максимального углового перемещения МСИУ в схеме по рисунку 1.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Mikhaylov O. P., Rogachev A.B., Ivensky U.N. Electromagnetic and magnetic devices in the machine tool industry.- M.: Engineering. 1974 . -184 pages. [in Russian]
2. A. G. Olabi, A. Grunwald, "Design and application of magnetostrictive materials" Materials & Design, Volume: 29, Issue: 2, 2008, pp. 469-483.
3. Patent № 2292611 of the Russian Federation. Magnetostriction device of angular movements and way of management of it / Grakhov P. A. Fedin A.V. – opubl..27.01.2007 [in Russian]
4. T. Okazaki, M. Tanaka, N. Okanisi et al., "Magnetostrictive properties of Fe-Ga/Ni bimorph layers", Materials Transactions, Volume: 48, Issue: 2, 2007, pp. 117-120.
5. P. A. Grakhov, A.V. Fedin, "The devices of angular displacements based on magnetostrictive plates", Electrical and data processing facilities and systems, Volume: 15, Issue: 1, 2019, pp. 112-121. [in Russian]
6. T.Kaniusas, Y.Pfutzner, T.Meydan et al., "Magnetoelastic Bilayer Sensors:from technology to application", Sensors Letters, Volume: 11, 2013, pp. 164-169.
7. Pavel A. Grakhov, Andrey V. Fedin, Vasikh Kh. Yasoveev, «Researches of displacement devices based on magnetostrictive bilayer plates under the action of pre-stressing caused by external and internal torques», 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), pp. 251-256, Ufa, Russia, 22 - 25 October 2019
8. P.A. Grakhov , A.V. Fedin, V. Kh. Yasoveev, S. A. Potapov, R. R. Mullayanov «Researches of action of pre-stressing caused by external and internal forces on devices based on magnetostrictive bilayer plates» // IEEE 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems: The international scientific and practical conference materials. Ufa State Aviation Technical University. – Ufa: publishing complex USATU, 2020, – 546 pages. - pp. 348-352.
9. P.A. Grakhov, A.V. Fedin, "Modeling of devices of angular micromovements on the basis of magnetostriction plates taking into account elastic tensions" Electrical and data processing facilities and systems, Volume: 9, Issue:1, 2013, pp. 9-17. [in Russian]
10. Патент № 193012 РФ на полезную модель. Магнестрикционное устройство угловых перемещений. / П.А. Грахов, В.Х. Ясовеев, А.В.Федин, Х.М. Хайбуллин, И.Р. Мухаметьянов // . – М: РОСПАТЕНТ, 2019.

Варламов А. Ю., Гришин Н. В., Железняк В. Н.
АО «Силовые машины» завод «Электросила»

ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ АО «СИЛОВЫЕ МАШИНЫ»

Аннотация: В работе отражено современное состояние разработки и производства мощных турбогенераторов на заводе «Электросила» АО «Силовые машины», предлагаемых для паровых и газовых турбин тепловых и атомных электростанций. Изложены основные подходы, применяемые при конструировании, текущие достигнутые технические параметры оборудования. Отражены основные предложения по турбогенераторам при реконструкциях с повышением мощности, выполняемых в рамках реализуемой Правительственной программы.

Ключевые слова: турбогенераторы, реконструкция, повышение мощности.

ВВЕДЕНИЕ

АО «Силовые машины» - крупнейшее энергомашиностроительное предприятие России, занимающее ведущее положение в отрасли. Продукция АО «Силовые машины» завоевала широкое признание на отечественном и мировом рынках. Завод «Электросила» АО «Силовые машины» изготавливает турбогенераторы, гидрогенераторы, крупные электрические машины постоянного и переменного тока, пусковую аппаратуру, системы возбуждения и другие изделия. В продуктовую линейку входят турбогенераторы для тепловых и атомных электростанций мощностью от 6 до 1300 МВт.

После успешного проведения программы ДПМ («Договор о поставке мощности»), нацеленной на строительство новых генерирующих мощностей в российской электроэнергетике, Правительство РФ разработало новую программу ДПМ-2, в рамках которой планируется модернизировать имеющиеся старые генерирующие мощности в объеме до 41 ГВт [1]. Старая технологическая база, созданная еще в прошлом веке, обуславливает низкую эффективность и большой объем затрат на поддержание оборудования в работоспособном состоянии.

Современные требования Правил технологического функционирования электроэнергетических систем обуславливают повышенные требования к надежности оборудования и работе при ликвидации аварийных ситуаций в энергосистеме [2]. До 1985 года установленный срок службы турбогенераторов

составлял 25 лет. На текущий момент более половины турбогенераторов, выпущенных заводом «Электросила» АО «Силовые машины» выработали срок службы. Все это подчеркивает своевременность и актуальность разработанной Правительством программы.

Заводом «Электросила» АО «Силовые машины» разработаны и реализуются проекты современных турбогенераторов с воздушным, водородным и водородо-водяным охлаждением, позволяющие осуществить реконструкцию энергетики и повысить надежность и эффективность генерации электроэнергии.

Для проектов модернизаций тепловых электростанций АО «Силовые машины» предлагают турбогенераторы в широком диапазоне мощностей и различных исполнениях как для паровых, так и для газовых турбин.

На предприятии постоянно ведутся работы по совершенствованию конструкции электрических машин. Для всех турбогенераторов разработаны единые принципы конструирования основных узлов. Применение единых принципов в создании серий турбогенераторов позволяет максимально отработать конструкцию, хорошо изучить поведение турбогенератора в эксплуатации и наладить серийное производство с большой унификацией узлов, использованием технологических приспособлений, простотой обслуживания, высокой надежностью в эксплуатации.

ПРИНЦИПЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОСНОВНЫХ УЗЛОВ

Турбогенератор представляет собой трехфазную синхронную электрическую машину с неявнополюсным ротором. Он состоит из неподвижной части – статора, включающего в себя сердечник и обмотку, и вращающейся части – ротора, на котором размещена обмотка возбуждения, питаемая постоянным током.

Сердечник статора собран из сегментов электротехнической стали. Поверхность сегментов покрыта изоляционным лаком класса F. Спрессованный сердечник статора стянут стальными ребрами и нажимными кольцами из

немагнитного металла. Для демпфирования магнитных потоков рассеяния лобовых частей обмотки статора, под нажимными кольцами установлены медные экраны и шунты из электротехнической стали. Данное решение совместно с применением запеченных крайних пакетов и интенсификацией их охлаждения позволяет обеспечивать работу в режимах потребления реактивной мощности. Связь сердечника с корпусом выполнена через упругую подвеску для уменьшения передачи колебаний на корпус и фундамент.

Обмотка статора – трехфазная, двухслойная, стержневая с укороченным шагом. Изоляция обмотки термореактивная класса F, выполненная по технологии изолировки стержней предварительно пропитанными лентами с последующей гидростатической опрессовкой и запечкой. Типовым соединением обмотки статора является схема «звезда».

Ротор изготавливается из цельной поковки высококачественной стали, обеспечивающей его механическую прочность при всех режимах работы генератора. В бочке ротора фрезеруются пазы, в которые укладывается обмотка возбуждения, изготовленная из полосовой меди, упрочненной присадкой серебра.

В пазовой части обмотка закреплена дюралюминиевыми клиньями. Лобовые части обмотки закреплены специальными клиньями и распорками и закрыты стеклотекстолитовыми сегментами и бандажными кольцами. Бандажные кольца однопосадочной конструкции изготавливаются из коррозионностойкой немагнитной стали. Для защиты ротора от воздействия токов обратной последовательности, возникающих при несимметричных режимах, установлены специальные короткозамыкающие сегменты. Пазовая и межвитковая изоляция класса F выполнена из стеклотекстолита на термореактивном связующем.

Генераторы соответствуют государственным и международным стандартам, обязательным требованиям Системного оператора Единой энергетической системы.

Генераторы сохраняют номинальную длительную мощность при отклонениях напряжения от минус 5 до плюс 5% номинального. Наибольшее рабочее напряжение составляет 110%, а наименьшее 90% номинального. Допускают продолжительную работу при отклонениях напряжения $\pm 5\%$ и частоты $\pm 2\%$ номинальных значений. Обеспечивают необходимые перегрузки по токам статора и ротора, работу в несимметричных режимах, работу при ликвидации аварийных ситуаций в энергосистеме.

Все генераторы комплектуются необходимыми вспомогательными системами и системой возбуждения. Турбогенераторы по согласованию с Заказчиком поставляются как в варианте со статической тиристорной системой самовозбуждения, так и с бесщеточной системой возбуждения.

Для контроля технологических параметров генератора поставляется система технологического контроля, по согласованию возможно использование существующих на станции систем.

Средний уровень звука на расстоянии 1 м от наружного контура турбогенератора со статической тиристорной системой возбуждения при установленном шумозащитном кожухе не превышает 80..85 дБ(А).

Средний срок службы турбогенераторов до 40 лет. Период между капитальными ремонтами до 10 лет.

Все турбогенераторы собираются на стенде предприятия-изготовителя и проходят полный объем приемо-сдаточных испытаний в присутствии представителей Заказчика.

Конструктивные отличия генераторов различных серий обусловлены в первую очередь используемым типом охлаждения.

Турбогенераторы с воздушным охлаждением

На заводе «Электросила» разработана серия турбогенераторов типа ТЗФ с воздушным охлаждением мощностью 50...350 МВт, предназначенных для сопряжения с паровыми и газовыми турбинами [3].

Примененная в турбогенераторах типа ТЗФ система вентиляции позволяет исключить последовательное расположение тепловыделяющих

элементов по ветвям вентиляционного тракта и встречное действие источников давления, осуществить при минимальных потерях мощности подачу холодного воздуха от воздухоохладителей ко всем активным частям машины по многопараллельной вытяжной схеме.

При установке на существующий фундамент при его удовлетворительном состоянии возможно сохранение существующих фундаментных плит. Турбогенераторы типа ТЗФП-80-2М позволяют выполнить замену генераторов ТВФ-55-2, ТВФ-60-2, ТВФ-63-2, а генераторы ТЗФП-130 замену ТВФ-100-2, ТВФ-120-2 без переустройства фундамента. При этом осуществляется возможность повышения установленной мощности энергоблоков.

Для замены генераторов старых выпусков, имеющих напряжение статора 6,3 кВ при соединении обмотки статора в звезду, для сохранения токопроводов и оборудования генераторного напряжения предлагаются серийные турбогенераторы на напряжение 6,3 кВ при соединении обмотки статора в треугольник. Разработано специальное исполнение турбогенератора ТЗФП-80-2М с нижним расположением нулевых и линейных выводов для использования существующего на станции токопровода.

АО «Силовые машины» реализуются проекты отечественных газовых турбин ГТЭ-65 и ГТЭ-170 для создания современных блоков ГТУ и ПГУ. Для агрегатирования с газовыми турбинами разработаны специальные исполнения генераторов с использованием основных конструктивных принципов, зарекомендовавших себя на паросиловых блоках. Турбогенераторы имеют статическую тиристорную систему самовозбуждения и снабжены тиристорным пусковым устройством для осуществления запуска ГТУ. Турбогенераторы для сопряжения с газовыми турбинами имеют верхнее расположение линейных выводов для оптимальной компоновки агрегата. Турбогенераторы комплектуются дополнительным подшипником со стороны турбины.

Паровая часть ПГУ комплектуется отработанными серийными турбогенераторами с воздушным охлаждением. Для комплектации паровой части ПГУ с использованием единого уровня генераторного напряжения

разработан турбогенератор ТЗФП-90-2/15,75 с номинальным напряжением статора 15,75 кВ.

Высокий потенциал применяемой системы воздушного охлаждения реализуется в изготавливаемом в настоящее время турбогенераторе с воздушным охлаждением мощностью 310 МВт, который послужит основой для дальнейших проектов по развитию отечественной энергетики.

Основные параметры турбогенераторов приведены в таблице 1 [3].

Таблица 1

Основные параметры турбогенераторов с воздушным охлаждением

Тип	ТЗФП-63-2	ТЗФП-80-2М ТЗФГ-80-2М	ТЗФП-90-2/15,75	ТЗФП-130-2	ТЗФП-210-2 ТЗФГ-210-2
Мощность на выводах, МВт	63	80	90	130	210
Коэффициент мощности	0,8	0,8	0,85	0,8 / 0,85	0,85
Мощность полная, МВА	78,75	100	105,9	162,5/152,94	247,1
Частота вращения, мин-1	3000	3000	3000	3000	3000
Частота, Гц	50	50	50	50	50
Напряжение, кВ	6,3 / 10,5	6,3 / 10,5	15,75	10,5	15,75
Ток статора, А	7217 / 4330	9165 / 5499	3881	8935/8410	9056
Заменяемые генераторы старых выпусков	ТВФ-60-2 ТВФ-63-2	ТВФ-55-2 ТВФ-60-2 ТВФ-63-2	-	ТВФ-100-2 ТВФ-120-2	-

Для турбогенераторов с водородным охлаждением ранних серий возможна замена современными серийными освоенными в производстве турбогенераторами с воздушным охлаждением с установкой на существующий фундамент в соответствии с таблицей II. Исключение вспомогательных систем газоснабжения и маслоснабжения уплотнений вала повышает безопасность, надежность, снижает затраты на эксплуатацию и ремонтное обслуживание.

Варианты замены турбогенераторов с водородным охлаждением ранних серий

Тип	Замена на турбогенератор
ТВ-25-2	ТФП-40-2Н
ТВ2-30-2	ТФП-40-2Н
ТВ-50-2	ТЗФП-63-2*
ТВ-60-2	ТЗФП-63-2*
ТВ2-100-2	ТФП-110-2/13,8

*- с доработкой фундамента.

ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ С ВОДОРОДНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Серия турбогенераторов с водородным охлаждением ТВФ включает в себя турбогенераторы мощностью от 50 до 220 МВт. Турбогенераторы этой серии прошли всесторонние исследования и хорошо зарекомендовали себя в эксплуатации на электростанциях. К настоящему времени изготовлено более 360 турбогенераторов серии ТВФ.

Генераторы серии ТВФ характеризуются следующими основными принципами. Охлаждение обмотки ротора - непосредственное, водородное по схеме самовентиляции, с забором газа из зазора между статором и ротором или из подпазового канала. Охлаждение обмотки статора – косвенное водородное. Охлаждение активной стали статора - непосредственное водородное.

Рост единичной мощности турбогенераторов потребовал в свое время введения водяного охлаждения обмоток статоров. Интенсификация охлаждения обмотки ротора позволяет увеличить нагрузки в существующих габаритах без увеличения нагрева обмотки. Применение современных материалов корпусной изоляции обмотки статора позволяет при сохранении допустимых уровней нагрева обмотки изготавливать генераторы на большую мощность: с косвенным водородным охлаждением в габаритах генератора с водородо-водяным охлаждением.

Для удобства замены турбогенераторы имеют напряжение статора, соответствующее заменяемым генераторам с водяным охлаждением обмотки статора. Замена производится с повышением мощности и использованием существующего фундамента без его доработки.

Турбогенераторы с косвенным водородным охлаждением обмотки статора имеют ряд преимуществ по сравнению с турбогенераторами с водородно-водяным охлаждением, основными из которых являются:

- повышение надежности и долговечности за счет полного исключения возможности появления течей или закупорок;
- упрощение эксплуатации, снижение объема регламентных и ремонтных работ за счет исключения системы водяного охлаждения генератора.

Для обеспечения косвенного охлаждения обмотки статора проектируются с более низким тепловыделением, чем обмотки с водяным охлаждением. Кроме того, турбогенераторы с водородным охлаждением характеризуются низким уровнем механических потерь. Поэтому при применении полного водородного охлаждения для заданных активной и реактивной мощности удается достигнуть высоких значений коэффициента полезного действия. Для мощных энергоблоков разработан инновационный проект турбогенератора мощностью 660 МВт с КПД 99%.

Для предотвращения выхода водорода генераторы снабжаются уплотнениями вала кольцевого типа, надежная работа которых не зависит от теплового расширения валопровода. Генераторы обеспечиваются вспомогательными системами: газоснабжения и маслоснабжения уплотнений вала, оборудование которых входит в комплект поставки по согласованию с Заказчиком. При удовлетворительном состоянии возможно использование систем, существующих на станции.

Основные параметры турбогенераторов приведены в таблице 3 [3].

Основные параметры турбогенераторов с водородным охлаждением

Тип	ТВФ-120	ТВФ-140	ТВФ-165-2	ТВФ-220	ТВФ-320	ТВФ-660
Мощность на выводах, МВт	125	140	165	225	320	660
Коэффициент мощности	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85	0,85
Мощность полная, МВА	147,1	164,7	194,1	264,7	376	776,5
Частота вращения, мин-1	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Частота, Гц	50	50	50	50	50	50
Напряжение, кВ	10,5	10,5	18	15,75	15,75	24
Ток статора, А	8086	9057	6226	9703	10870	18680
Заменяемые генераторы старых выпусков без переустройства фундамента	ТВФ-100-2 ТВФ-120-2	ТВФ-100-2 ТВФ-120-2	ТВВ-165-2	ТВВ-200-2 ТВВ-220-2	ТВВ-320	-

ТУРБОГЕНЕРАТОРЫ С ВОДОРОДНО-ВОДЯНЫМ ОХЛАЖДЕНИЕМ

Серия турбогенераторов с водородо-водяным охлаждением ТВВ включает в себя турбогенераторы мощностью от 160 МВт до 1300 МВт. К настоящему времени изготовлено более 600 турбогенераторов этой серии. Накопленный опыт эксплуатации, технических инспекций и исследований позволяет определить пути для дальнейшего совершенствования конструкции.

Турбогенераторы серии ТВВ имеют непосредственное охлаждение обмотки ротора водородом, обмотки статора дистиллированной водой и сердечника статора водородом. Применение современных материалов, эффективность водяного охлаждения и интенсификация охлаждения обмотки ротора позволяют изготовить турбогенераторы повышенной мощности в существующих габаритах для установки на существующий фундамент без его доработки.

Генераторы комплектуются необходимыми вспомогательными системами: системой газоснабжения; системой маслоснабжения уплотнения

вала; системой водяного охлаждения обмотки статора. По согласованию с Заказчиком возможно использование существующих на станции систем, комплектация генератора аварийным выбросом водорода.

Высокая эффективность конструктивных решений, заложенных в серии турбогенераторов ТВВ, позволяет создавать серийные машины до мощности 1300 МВт и выше. В 2021 году успешно прошел заводские приемочные испытания головной образец тихоходного турбогенератора мощностью 1255 МВт – являющейся в РФ наибольшей из достигнутых (рис. 1). Референтность принятых технических решений подтверждаются многолетней успешной эксплуатацией на тепловых и атомных электростанциях.

Основные параметры турбогенераторов приведены в таблице 4 [3].

Таблица 4

Основные параметры турбогенераторов с водородно-водяным охлаждением

Тип	ТВВ-	ТВВ-	ТВВ-	ТВВ-	ТВВ-	ТВВ-	ТВВ-	ТВВ-	ТВВ-
Мощность на выводах, МВт	160	236	350	550	830	1100	1170	1320	1255
Коэффициент мощности	0,85	0,85	0,85	0,85	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9
Мощность полная, МВА	188,2	277,6	411,8	647	922	1222	1300	1467	1395
Частота вращения, мин-1	3000	3000	3000	3000	3000	3000	1500	3000	1500
Частота, Гц	50	50	50	50	50	50	50	50	50
Напряжение, кВ	18	15,75	20	20	24	24	24	24	24
Ток статора, А	6038	10178	11887	18680	22185	29400	31273	17641	33545
Генераторы старых выпусков, заменяемые без переустройства фундамента	ТВВ-160-2Е	ТВВ-200-2 ТВВ-220-2	ТВВ-320-2	ТВВ-500-2	ТВВ-800-2	ТВВ-1000-2	ТВВ-1000-4	ТВВ-1200-2	-



Рис. 1. Доставка статора турбогенератора ТВВ-1200-4У3 на площадку строительства станции [4]

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

АО «Силовые машины» предлагает турбогенераторы для обновления ресурса, повышения надежности, эффективности и увеличения установленной мощности электростанций.

Турбогенераторы проходят всесторонние испытания на предприятии-изготовителе и соответствуют современным техническим требованиям. Освоенные серийные машины постоянно совершенствуются с использованием опробованных технических решений, современных методов проектирования и материалов для осуществления замены с увеличением мощности устаревшего и выработавшего свой ресурс оборудования.

Для новых паросиловых блоков и отечественных энергетических газотурбинных установок предлагаются современные турбогенераторы с техническими характеристиками, соответствующими мировым аналогам.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Что такое программа ДПМ-2 и чем она обернется для энергетиков [Online]. Available: <https://bcs-express.ru/novosti-i-analitika/cto-takoe-programma-dpm-2-i-chem-ona-obernetsia-dlia-energetikov>
2. Приказ от 19 июня 2003 г. N229 Министерства Энергетики Российской Федерации, 151 р.
3. Варламов А.Ю., Гришин Н.В., Железняк В.Н.. Турбогенераторы АО «Силовые машины» для паровых и газовых турбин. / Сборник докладов и каталог XIV всероссийской конференции «Реконструкция Энергетики-2022», pp.36-41
4. На стройплощадке Курской АЭС-2 смонтирован статор самого мощного в России турбогенератора [Online]. Available: <https://www.rosatom.ru/journalist/news/nastroyploshchadke-kurskoj-aes-2-smontirovan-stator-samogo-moshchnogo-v-rossii-turbogeneratora/>.

НОВЫЕ ШЛИФУЮЩИЕ МАТЕРИАЛЫ ДЛЯ ПОВЫШЕНИЯ ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ УЗЛА СКОЛЬЗЯЩЕГО ТОКОСЪЕМА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН

Аннотация: Вопросы наведения и стирания политурной (окисно-закисной) пленки на коллекторах и контактных кольцах электрических машин постоянно находятся в поле зрения специалистов электромехаников. Политурная пленка является твердой смазкой, снижающей коэффициент трения скольжения в узле скользящего токосъема (УСТ) электрических машин, что позволяет в свою очередь снизить износы штатных щеток, коллекторов и контактных колец. Отсутствие политурной пленки (невозможность образования) увеличивает износы щеток в сотни раз. В то же время слишком большая толщина политурной пленки тоже может привести к расколу щеток за счет возникновения молекулярных сил сцепления и даже не запуску электродвигателя. В связи с этим, управление состоянием политурной пленки в УСТ несомненно представляет актуальную задачу. Эта работа посвящена попытке применения недорогого решения эффективной очистки металлических контактных поверхностей электрических машин (ЭМ) от негативных образований на поверхности пар трения с использованием талько-наполненного композита вставляемого в виде брикета в штатное окно щеткодержателя на дорожке скольжения электрических машин большой мощности.

Ключевые слова: политурная пленка, износы, электрощетки, коллектор и контактные кольца, электрические машины, тальк, шлифовальный брикет, нагары.

ВВЕДЕНИЕ

Надежность электрических машин, имеющих в своем составе узел скользящего токосъема (УСТ), во многом зависит от скорости износа коллекторов и токоведущих щеток, которая в свою очередь определяется наличием и состоянием поверхностной политурной пленки (ПП) [1], [2], [3]. ПП выполняет роль смазки, для контактных поверхностей неподвижных электрических щеток и коллектора, а также выполняет роль покровной защитной пленки, обладающей переходным сопротивлением, для осуществления стабильного электрического переноса. Нормативными документами количественное значение переходного сопротивления ПП не нормируется в силу ее возможной специфической структурной трансформации в каждом конкретном случае работы узла, а толщина находится в целом в пределах (5-100) нм. Она состоит из оксидной составляющей металла с

различной стехиометрией и находящейся поверх нее пленки углеродистого материала щетки и прочих компонентов входящих в состав щеточного изделия.

Наличие «нормальной» ПП, как показывают исследования, означает, что сопротивление перехода пленки является самым значимым сопротивлением из всех возможных сопротивлений, стоящих на пути прохождения тока от траверсы до металла коллектора. ПП находится в динамическом равновесии, при котором происходит процесс ее формирования и ее разрушения вследствие шлифующего действия щеток.

На поверхности коллектора или контактного кольца электрическим машинам постоянного и переменного тока общепромышленного применения даже в условиях приемлемой коммутации часто образуются не токопроводящие пятна - «нагары», представляющие собой толстые оксидные пленки [4], [5], [6]. Также отмечается появление пятен – налетов химического происхождения [6], [7]. Кроме того, в определенных атмосферных условиях и неблагоприятных коммутационных режимах работы электрической машины, часто сопровождающихся повышенным искрением, происходит образование окисно-закисной составляющей политурной пленки высокой толщины и сопротивления [8], [9], [10]. Эти негативные процессы ухудшают токораспределение по параллельно работающим щеткам, приводят к дополнительным потерям. Концентрация токовой нагрузки на отдельных щетках часто приводит как к повышенному износу штатных угольных щеточных материалов, так и в отдельных случаях к их расколу и даже взрыву. [11], [12], [13].

В двигателях постоянного тока широкое применение нашли много-щеточные узлы скользящего токосъема с параллельно работающими щетками, предназначенными для подвода рабочих токов к вращающимся частям электрической машины. Как показывает опыт эксплуатации щеточно-коллекторных узлов двигателей прокатных станков, в большинстве случаев возникают три острые проблемы: повышенные износы электрических щеток, их искрение в следствии процессов коммутации, и как следствие, недопустимо высокая температура ЩКА.

По этой же причине при отсутствии профилактических мероприятий часто происходит электромеханическая эрозия коллекторов и колец, при этом износ может выходить за пределы ремонтных размеров с последующей отбраковкой токосъемных колец и коллекторов [14], [15], [16], [17]. На мощных электрических машинах (на турбогенераторах) это приводит к большим дополнительным капиталовложениям как на внеплановые ремонтные мероприятия из-за необходимости замены контактных пар на новые, финансовые потери на приобретение новых комплектаций, так и потери времени и увеличение трудоемкости за счет дополнительных демонтажнo-монтажных мероприятий.

Часто проблему устранения так называемых «нагаров», представляющих собой плотно-сцепленные оксидные пленки, а также солевые отложения химического происхождения (ухудшающие коммутацию ЭМ) решают ручным механическим снятием шлифовальными шкурками или шлифовальными брусками (камнями). Они имеют в зависимости от конструкции различные варианты исполнения в том числе и с прижимными ручками (рукоятками, кольцами) и имеют маркировки 90602N - 90672N, а также дополнительные обозначения зернистости шлифовального камня (С, М, F, Р). При этом по инструкции к эксплуатации рекомендуется вести обработку сначала крупнозернистым бруском, а затем последовательно несколькими брусками с постепенно убывающей величиной зерен от С до Р [16], [17], [18].

Подобная обработка представляет собой как сравнительно трудоемкую задачу, так и имеет существенный недостаток, определяемый субъективным прижимным воздействием обслуживающего - ремонтного персонала. Дополнительно, твердые зерна абразивной составляющей шлифовальных камней и брусков шаржируют (насыщают) материал поверхностного слоя коллектора или кольца, что ведет к повышению интенсивности электроэрозионного изнашивания коллектора и щеток. Кроме того, твердые абразивные материалы приводят к образованию завалов на краях коллекторных

пластин глубиной до $0,2 \div 0,5$ мм, уменьшающих площадь контакта коллектор щетка, кольцо-щетка [19], [20], [21].

Все вместе это часто приводит к неравномерной выработке металлической поверхности и как результат возникновение повышенного уровня искрения из-за ухудшения механики контакта.

В некоторых проблемных случаях из-за «нагаров» вследствие «кругового огня» требуется трудоемкая операция фрезерной обработкой цилиндрической вращающейся поверхности. Использование токарного резца чаще всего с режущей частью из вольфрамо - кобальтовых сплавов типа ВК-8 для обточки рабочей поверхности коллектора или токосъемного кольца часто сопровождается образованием заусенец на кромках коллекторных пластин и колец, также ухудшающих механическое сопряжение щетка - кольцо или коллектор. Операция, связанная с зачисткой заусенцев, является крайне трудоемкой и часто осуществляется вручную [22], [24], [24], [25], [26], [27]. В связи с этим было принято решение опробовать для очистки поверхности коллекторов или токосъемных колец шлифующих композиционных материалов располагаемые в свободный щеточный узел притом эффективность обработки при вращении якоря повышалась.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

Реализация технического решения производили на основе исследования получения брикетов порошкового талька на бакелитовой связке при варьировании давления прессовки смеси. Экспериментально было подобрано давление прессовки, позволяющее достигать высоких прочностных показателей брикета, который затем термонормализовался в электрошкафу. Приспособление для шлифования металлической поверхности УСТ представляло собой не токопроводящую шлифовальную щетку(брикет), из композиционного материала, полученную при температурном смешении порошка определенной марки талька и бакелитового лака приводящее к образованию резинной смеси, вследствие полимеризации лака.

И в последующем смесь подвергалась прессованию в соответствующей пресс-форме при цеховой температуре.

Размеры контактной поверхности шлифовальной щетки(брикета) равны токосъемным щеткам. Шлифовальная щетка устанавливается на дорожку скольжения совместно с отработанной штатной щеткой. При этом каждая шлифовальная щетка скрепляется с отработанной штатной щеткой и подпружинивается в щеткодержателе штатной щеточной пружиной.

На рис. 1 представлен щеточно-коллекторный узел, который имеет в своем составе: коллектор 1, токосъемные щетки 2 в штатных щеткодержателях 3, шлифовальную щетку 4, скрепленную с отработанной штатной щеткой 5.

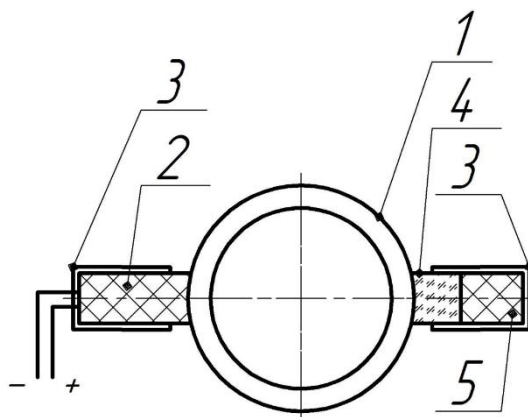


Рис. 1. Щеточно-коллекторный узел с составной шлифовальной щеткой

Работа предлагаемого технического решения в щеточно-коллекторном узле осуществляется следующим образом. При вращении коллектора шлифующие щетки очищают поверхность коллектора или контактного кольца, по которой скользят токосъемные щетки. Оценку толщины политурной пленки кроме визуализации осуществляли по величине ее сопротивления.

Замер сопротивления политурной пленки по дорожке коллектора производился при помощи цифрового миллиметра и посеребренных щупов (рис. 2).

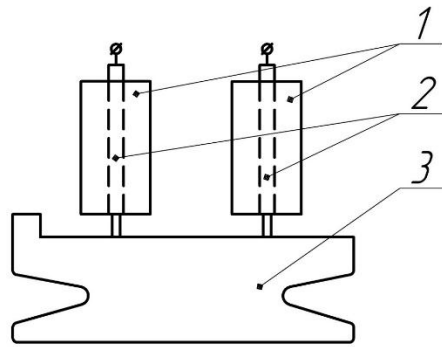


Рис. 2. Установка щупов для определения сопротивления политурной пленки:
 1 – фальш-щетка; 2 – посеребренные щупы; 3 – коллекторная пластина

ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

Предварительную оценку возможности использования талькового композита в качестве шлифующего агента оценивалось на машинах МШУ (машинах шлифовальных-универсальных), модернизированных под испытательный стенд. В данных машинах дополнительно было изготовлено окно, в которое вставлялся подпружиненный тальконаполненный композит, который фиксировался резиновой заглушкой (рис. 3)



Рис. 3. Испытательный стенд с окном под шлифовальный композит

Композит располагался на дорожке скольжения штатных щеток. Коллектор электрической машины имел на поверхности «нагар», полученный в неоптимальных условиях коммутации. Результаты опытов по снятию политурной пленки тальком представлены в таблице 1.

Снижение толщины политушной пленки при шлифовании талько-наполненным композитом медного коллектора

№	Сопротивление политушной пленки, Ом			
	Начальное	Через 3 мин шлифования	Через 10 мин шлифования	Через 15 мин шлифования
1	0,47	0,4	0,3	0,03
2	0,52	0,48	0,32	0,02
3	0,5	0,43	0,27	0,03
Среднее значение	0,5	0,44	0,3	0,03

В случае использования предлагаемой шлифовальной щетки, внешний вид которой приведен на рис. 4, происходит полная очистка поверхности медного коллектора от окисно-закисной пленки и нагара, в значительной мере повышается точность сопряжения шлифовального брикета с очищаемой поверхностью, увеличивается производительность процесса, составляющего 10-15 мин, уменьшается трудоемкость операции шлифования. Проверка технического решения на стальных кольцах преобразователей ПО-250 и бронзовых коллекторах генераторов ГС-12 ТОК также подтвердило эффективность принятого подхода.



Рис. 4. Внешний вид шлифовальной щетки для генератора ГС-12ТОК

Шлифующие щетки производят эффективную очистку поверхности коллектора или кольца электрической машины без нарушения профиля поверхности колец или коллектора. Вследствие низкой адгезии к металлической поверхности талька, его шлифовальная пыль легко выдувается из зоны контакта.

Размеры опытно-промышленной пресс-формы позволяют производить шлифующие брикеты, соответствующие геометрическим размерам штатных промышленных щеток турбогенераторов. В целях улучшения материалоемкости процесса возможно использование отработанных штатных щеток как носителя шлифующего брикета и позволяет легко подвести размер шлифующего брикета под размер штатной щетки. На предлагаемое техническое решение имеется приоритет в федеральном институте промышленной собственности [28]. Предлагаем поставки партий шлифующих не электропроводящих щеток на ЭМ большой мощности заинтересованным производителям электрической энергии на хоздоговорных условиях.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шантаренко С.Г. Повышение качества токосъема в контакте «щетка-коллектор» тягового электродвигателя электровоза 2ЭС6/С.Г. Шантаренко, В.Ф. Кузнецов, Е.В. Пономарев, В.А. Тараненко // Омский научный вестник.-2016.- №5.- С.77-80.
2. Белан Д.Ю. Электроискровая обработка с позиционированием электродов относительно поверхности коллектора электрической машины/Д.Ю. Белан, А.О. Отраднова // Омский научный вестник.-2013.-№ 3.- С.92-96.
3. Копылов И. П. Электрические машины / И. П. Копылов // М.: Логос, 2000. 607 с.
4. Стекольников Ю.А. Физико-химические процессы в технологии машиностроения. Учеб. пособие / Стекольников Ю.А., Стекольников Н.М. - Елец: Издательство Елецкого государственного университета имени И.А. Бунина, 2008. - 136с.
5. Качин С.И. Результаты исследования влияния механического состояния коллекторов и подшипников на процессы износа в скользящем контакте электрической машины / С.И. Качин, О.С. Качин // Известия высших учебных заведений. Электротехника. – 2011. - №6. – С. 5-9.
6. Самородов Ю.Н. Риски повреждения турбогенераторов из-за дефектов. Библиотечка электротехника/Ю.Н. Самородов.- Выпуск 4., Часть 2. – М.: НТФ «Энергопрогресс», 2011.- 64с.
7. Цопов Г.И. Механизм контактирования скользящего контакта из углеграфитовых материалов / Г.И. Цопов, В.Н. Овсянников, Н.А. Елшанский // Вестник транспорта Поволжья. - 2014. - №1(43). - С. 111-114.
8. Сафонов А.Л. Прямоугольные электрические соединители. Фреттинг - коррозия в электрических контактах / А.Л. Сафонов, Л.И. Сафонов // Технологии в электронной промышленности. – 2009. - №3. - С.48-54.
9. Мышкин Н.К. Трение, смазка, износ. Физические основы и технические приложения трибологии/Н.К. Мышкин, М.И. Петроковец. – М.: ФИЗМАЛИТ, 2007. – 368 с.
10. Тимошенко В. Н. Снижение износа щеток в коллекторных машинах постоянного и переменного тока: диссертация кандидата технических наук. - Киров, 2018. – 154 с.
11. Фоминых А.А. Оценка влияния твердой смазки на трибохарактеристики узлов скользящего токосъема: диссертация кандидата технических наук. - Киров, 2015. -233 с.
12. Самородов Ю.Н. Риски повреждения турбогенераторов. Библиотечка электротехника. Выпуск 3. Часть 1: М., НТФ «Энергопрогресс», «Энергетик», 2011. - 80с.

13. Ростик Г.В. Оценка технического состояния турбогенераторов: учеб. -практ. пособие / Г. В. Ростик; Федер. агентство по образованию, Ин-т повышения квалификации гос. служащих, каф. "Эксплуатация энергет. объектов и энергосбытовая деятельность", сектор "Техн. перевооружение, модернизация и ремонт в энергетике". - Москва: ИПК госслужбы, 2008. - 489 с.
14. Качин О.С. Повышение ресурса скользящего контакта универсальных коллекторных электродвигателей: диссертация на соискание ученой степени канд. техн. наук. – Томск, 2008. -178с.
15. Мышкин Н.К. Электрические контакты. / Н.К. Мышкин, В.В. Кончиц, М.К. Браунович. – М.: Издательский дом «Интеллект», 2008. – 560с.
16. ГОСТ 6456-82. Шкурка шлифовальная бумажная. Технические условия.
17. ГОСТ 9506.7 - 7 4. Щетки электрических машин.
18. ГОСТ 33534-2015. Бруски и сегменты шлифовальные.
19. РД 34.45.502. Инструкция по эксплуатации узла контактных колец и щеточного аппарата турбогенераторов мощностью 165-300 МВт.
20. Азбукин Ю. И., Повышение эффективности эксплуатации турбогенераторов/ Ю.А. Азбукин - М.: Энергеатомиздат, 1983. - 81с.
21. Петроченко С. В. Совершенствование технологии обточки рабочей поверхности коллекторов тяговых электродвигателей / С. В. Петроченко // Транспорт Урала. – 2010. – № 2. – С. 53–55.
22. Петроченко С.В. Федоров А.А. Технология повышения качества рабочей поверхности коллекторов машин постоянного тока при механической обработке//Омский научный вестник. - 2014г. - №1. - С.113-117.
23. Солдаткин, А. В. Повышение коммутационной устойчивости тяговых электрических машин за счет совершенствования технологии ремонта коллекторов: авто-реф. дис. канд. техн. наук: 05.22.07 / А. В. Солдаткин. – Омск, 2013. – 22 с.
24. Белан Д. Ю. Повышение надежности работы коллекторно-щеточного узла тяговых электродвигателей / Д. Ю. Белан, В. М. Лузин // Известия Транссиба. – 2010. – № 4 (4). – С. 6–11.
25. Попов А.Ю. Повышение качества ремонта коллекторов тяговых электродвигателей путем совершенствования геометрии режущего инструмента / А.Ю. Попов, Д.Ю. Белан, В.В. Дюндин // Омский научный вестник. - 2015г. - №3. - С.38-41.
26. Kharlamov V.V. Determination wear intensity of electrical brushes in DC machines considering impact of collector's surface. / V.V. Kharlamov, D.I. Popov, M.F. Baysadykov // Journal of Physics: Conference Series 1260(5), 052009. -2019.
27. Kharlamov V.V. Effect of transient processes on the switching stability of dc machines / V.V. Kharlamov, P.K. Shkodun, A. Ognevsky // MATEC Web of Conferences 239, 01036. 2018.
28. Патент РФ №2020142184/21.12.2020 Изотов А.И., Изотов С.А., Фоминых А.А., Тимошенко В.Н.//Не токопроводящая шлифовальная щетка для токосъемных колец и коллекторов электрических машин.

Дадоян Р. Г., Тарасов Н. Г., Вавилов В. Е., Подгузов А. А., Ермоленко А. Н.
Уфимский университет науки и технологий

ОПРЕДЕЛЕНИЕ МЕХАНИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК БАНДАЖЕЙ ИЗ ПКМ ДЛЯ ОЦЕНКИ НДС РОТОРОВ ЭМ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ¹

Аннотация: Представлено экспериментальное исследование механических характеристик углепластиковых деталей для электрических машин на основе плоских и кольцевых образцов из высокопрочного и высокомодульного углеволокна UMT530-12K EP и связующего ТО200.
Ключевые слова: электрическая машина с постоянными магнитами, полимерный композиционный материал, углепластик, бандаж.

ВВЕДЕНИЕ

Разработка современной авиационной техники требует внедрение новых высокопрочных и надежных материалов из-за роста нагрузки на детали и повышения уровня требований к технике в целом.

В области создания перспективных электрических машин (ЭМ) одним из ключевых ограничивающих работу ЭМ деталей является бандаж. К бандажу современных ЭМ предъявляются высокие требования по предельным растягивающим напряжениям, вызванными центробежными силами от поверхностных постоянных магнитов. В связи с этим задача изготовления высокопрочных бандажей из композиционного материала (КМ) является актуальной.

В качестве наполнителя могут выступать стекловолокна, стеклоткани, углеволокна, углеткани, жгуты из стекловолокон и углеволокон, борные волокна и др. Наиболее распространено применяются углеродные волокна в связи с высокими требованиями по прочности и модулю упругости. В ЭМ с постоянными магнитами приходится использовать материалы, которые одновременно обладают высокой прочностью и высоким модулем упругости при растяжении, что связано с необходимостью сохранения исходного положения постоянных магнитов (ПМ) и предотвращения отрыва от поверхности магнитопровода.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0838-2020-0006.

Из подходящих углеволокон от отечественных производителей можно отметить продукцию ООО «Алабуга-Волокно» –волокна из сырья UMT 49S-12K EP.

Волокна из данного сырья наиболее часто применяются в процессе импортозамещения зарубежной продукции [1] – [3].

В качестве связующего могут применяться терморезактивные полимеры, термопластичные полимеры.

Терморезактивные полимеры под действием тепла и химически активных добавок могут приобретать пространственную структуру, что сопровождается потерей текучести. Обычно в них вводят совместимые и несовместимые добавки, такие, как наполнители, разбавители, загустители, стабилизаторы, красители, смазки, и благодаря этому получают сложные многокомпонентные материалы – реактопласты [4]. Термопластичные полимеры – полимеры, которые размягчаются при нагревании и затвердевают при охлаждении. Переходы между состояниями обратимы и могут повторяться многократно [4].

Композиционные термопластичные материалы (КТМ) обладают такими преимуществами, как высокая на 20-40% стойкость к ударным нагрузкам, повреждениям, высокая устойчивость к воде, химическая стойкость, а также технологические преимущества [5]. Однако КТМ обладают высокой температурой переработки (200 - 400°C), затрудненная выкладка препрега, у которой нет липкости [6]. Также не все термопласты склонны к волокнообразованию. Качество пропитки существенно влияет на механические характеристики КТМ по сравнению с ПКМ на основе терморезактивных полимеров.

Наблюдается рост количества применения препрегов на клеевой основе в ПКМ [7]. В работе [1] представлена разработка клеевого препрега КМКУ-3м на основе отечественного высокопрочного углеродного жгутового наполнителя марки UMT49S-12K фирмы UMATEX и клеевого связующего марки ВСК-14-3. Согласно данным в источнике [1], полученный углепластик ВКУ-30К.UMT обладает пределом прочности при растяжении 1780 МПа при 20 °С и 1730 МПа

при температуре 150 °С. При этом в работе используется низко модульное волокно ($\approx 210-250$ ГПа), в результате чего углепластик обладает осредненным по температуре испытания модулем упругости 130 ГПа. В работе [1] проводится сравнение механических характеристик ВКУ-30К.УМТ с ВКУ-30К.Р14535 из иностранного волокна. Максимальная рабочая температура составляет 150°С. Низкая рабочая температура связана со свойствами связующего ВСК-14-3, обладающая рабочей температурой 150°С. Стоит также отметить, что ВСК-14-3 требует отвердевания при 175°С [8], что в свою очередь накладывает ограничение по применению в роторах ЭМ с ПМ, рабочая температура которых невысокая (≈ 150 °С). При применении ПМ с более высокой рабочей температурой применение углепластика на основе клеевого связующего становится возможным, но нужно учитывать технологические особенности работы с препрегом.

В работе [2] проводится сравнение механических характеристик ПКМ ВКУ-25/УМТ49 при 20°С из волокна УМТ49-12К-ЕР и связующего ВСЭ-1212 и ПКМ ВКУ-25 на основе углеродного жгута HTS-45 12К фирмы Toho Tenax также из связующего ВСЭ-1212. Аналогично сравниваются ВКУ-29, ВКУ-39 из волокна УМТ49-12К-ЕР и связующего ВСЭ-1212 с зарубежными аналогами. Наблюдается одинаковый уровень механических характеристик ПКМ. Недостатком полученных композиционных материалов является низкая рабочая температура до 120°С [9], а также необходимость обработки при температуре 180°С.

Целью настоящей работы является разработка высокопрочного и высоко модульного ПКМ из отечественных компонентов для применения в электрических машинах и определение его механических характеристик.

В работе представлено исследование механических характеристик ПКМ на основе плоских образцов. Также представлены результаты испытаний на разрыв кольцевых образцов из ПКМ.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

В лаборатории композиционных материалов НИИ ЭТКиС применяется станок для изготовления трубчатых деталей СН-8.0-1100 (рис. 1).

В качестве наполнителя используется углеродное волокно UMT530-12К EP фирмы UMATEX из сырья UMT 49S-12К EP. Механические свойства применяемого волокна представлены в табл. 1.

Таблица 1

Механические свойства волокна UMT530-12К EP

Свойство	Значение
Предел прочности при растяжении, ГПа	4
Модуль упругости при растяжении, ГПа	530
Предельная деформация, %	0,7
Линейная плотность, текс	680
Объемная плотность, г/см ³	1,93

В качестве связующего выбрано связующее ТО200. Связующее ТО200 позволяет достичь лучших механических характеристик при более низких температурах отверждения, а также позволяет осуществить намотку на «холодную» оснастку (или ротор). Свойства ТО200 представлены в табл. 2.

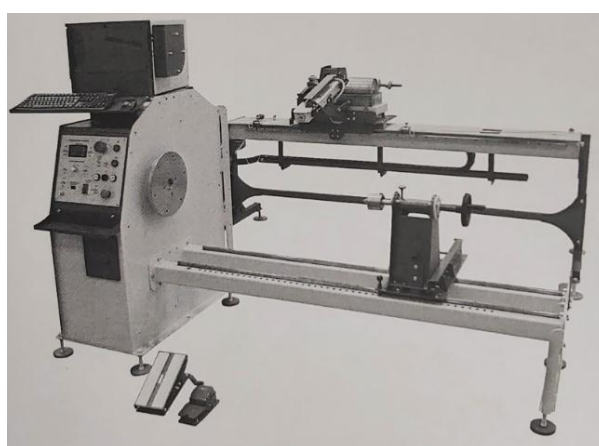


Рис. 1. Общий вид намоточного станка

Свойства связующего ТО200

Свойство	Значение
Предел прочности при растяжении, МПа	60
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3,26
Удлинение при разрыве, %	94
Температура стеклования, °С	221
Плотность отвержденного связующего, г/см ³	1,147

В исследовании проводится поиск оптимальных технологических режимов, обеспечивающих лучшие механические характеристики.

Для определения свойств ПКМ из UMT530-12К EP и связующего ТО200 изготовлены плоские образцы. На плоских образцах упрощается методика проведения испытаний на разрыв путем нанесения меток на поверхность и определения деформаций при растяжении (рис. 2). На кольцевых образцах определение деформаций является затруднительным.

Таким образом, изготовлены плоские образцы для испытаний на растяжение вдоль и поперек волокон и на изгиб. Требования к форме и размерам образцов, а также к изготовлению и испытаниям представлены в ГОСТ Р 56785 – 2015 и ГОСТ Р 56810-2015. Геометрические размеры образцов для испытаний на растяжение представлены в табл. 3.

Таблица 3

Размеры плоских образцов для растяжения

Параметр	Обозначение	Угол ориентации волокон	
		0°	90°
Длина образца, мм	l	250	175
Длина рабочей зоны, мм	l _{рз}	90	90
Длина нерабочей зоны, мм	l _н	-	-
Длина накладки, мм		60	25
Толщина накладок, мм		1,5	1,5
Ширина, мм	b	15	25
Толщина, мм	h	1,2	2



Рис. 2. Плоский образец с метками в зажимах при испытании

Геометрические размеры плоских образцов для испытаний на изгиб представлены в табл. 4.

Таблица 4

Размеры плоских образцов для испытаний на изгиб

Параметр	Обозначение	Направление волокон
		0°
Длина образца, мм	l	51
Длина пролета, мм	L	25
Ширина, мм	b	12
Толщина, мм	h	1,5

Образцы для испытаний на растяжение вдоль волокон и поперек представлены на рис. 3 и 4 соответственно. На рис. 5 представлены образцы для испытаний на изгиб.



Рис. 3. Плоские образцы для испытаний на растяжение вдоль волокон

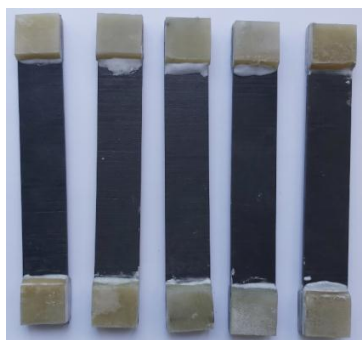


Рис. 4. Плоские образцы для испытаний на растяжение поперек волокон



Рис. 5. Плоские образцы для испытаний на изгиб (поперек волокон)

Испытание серии плоских образцов на растяжение при высокой температуре в ходе проведения исследования показало, что существует проблема захвата образцов и проблема отрыва накладок на образцах. Поэтому авторами работы дальнейшее определение механических свойств осуществлялось на кольцевых образцах. Требования к форме и размерам кольцевых образцов, а также к изготовлению и испытаниям представлены в ГОСТ 25.603-82. Геометрические размеры кольцевых образцов для испытаний на растяжение представлены в табл.

Таблица 5

Размеры кольцевых образцов для растяжения

Параметр	Обозначение	Направление волокон
		0°
Внутренний диаметр, мм	d	100
Толщина, мм	h	1,6
Ширина, мм	b	8
Отношение внутреннего диаметра к толщине	d/h	>50

На рис. 6 представлены кольцевые образцы для испытаний на растяжение.



Рис. 6. Кольцевые образцы для испытаний на растяжение

Испытания образцов осуществляются на испытательной установке Instron 3382 (рис. 7). Максимальная нагрузочная способность установки 100 кН.

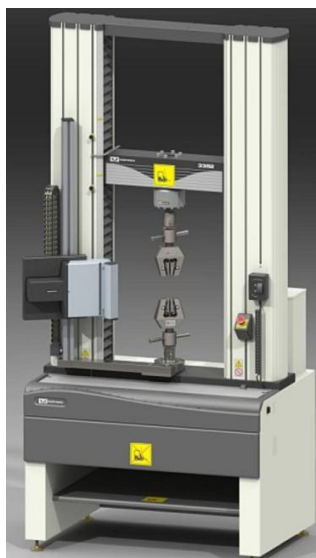


Рис. 7. Испытательная машина Instron 3382

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЯ

В ходе проведения испытаний плоских образцов на растяжение вдоль волокон наблюдался ступенчатый характер разрушения образца – в следствие неравномерного зажима на накладках происходит ступенчатое нагружение части волокон в образце и затем более ранний разрыв (рис. 8). В некоторых случаях нагружение образцов свыше 25 кН приводило к отрыву накладок с образцов. На рис. 9 представлен образец после разрушения при растяжении поперек волокон.

Для испытаний на растяжение кольцевых образцов разработана и изготовлена оснастка для испытаний (рис. 10).

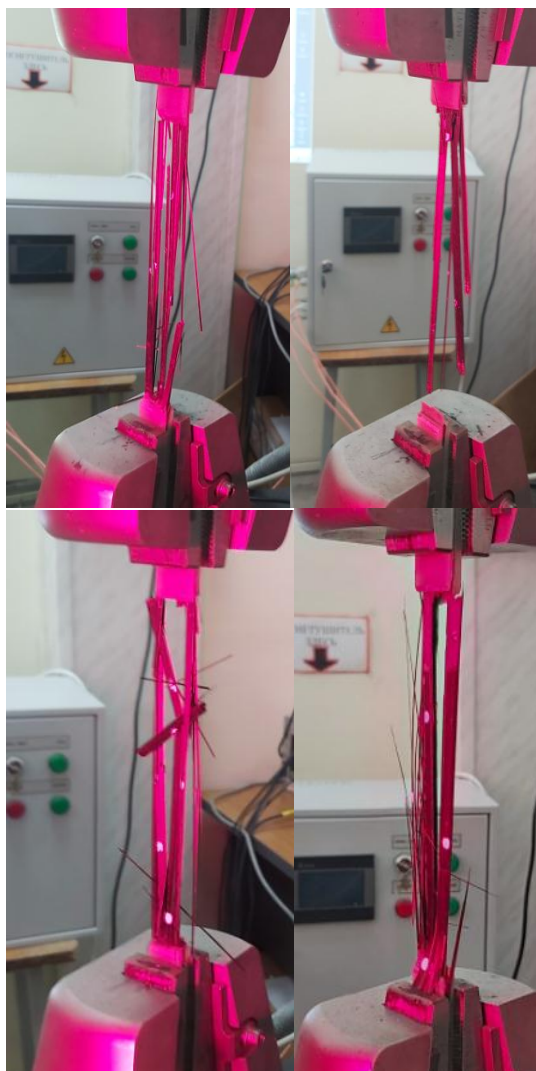


Рис. 8. Характер разрушения плоских образцов при растяжении вдоль волокон

В табл. 6 и 7 представлены результаты испытаний на растяжение вдоль и поперек волокон и изгиба при температурах испытаний 20°C и 160°C.

Предельная прочность при растяжении вдоль волокон 1560 МПа в ходе испытаний достигнута также при наличии ступенчатого разрушения. Нагрев образцов привел к увеличению влияния затяжки и отрыва накладок на предельную прочность (1200 МПа), так как отрыв с накладок происходит неравномерно и неодновременно, что приводит к преждевременному разрушению части волокон и образца.



Рис. 9. Образец после разрушения при растяжении поперек волокон

Таблица 6

Механические свойства плоских образцов при 20°

	Растяжение вдоль волокон	Растяжение поперек волокон	Изгиб
Предел прочности МПа	1560	9,5	-
Модуль упругости, ГПа	250 - 260	4,8	80
Плотность, кг/м ³	1560		

Таблица 7

Механические свойства плоских образцов при 160°

	Растяжение вдоль волокон	Растяжение поперек волокон	Изгиб
Предел прочности МПа	1200	4	-
Модуль упругости, ГПа	240 - 250	3	-
Плотность, кг/м ³	1560		

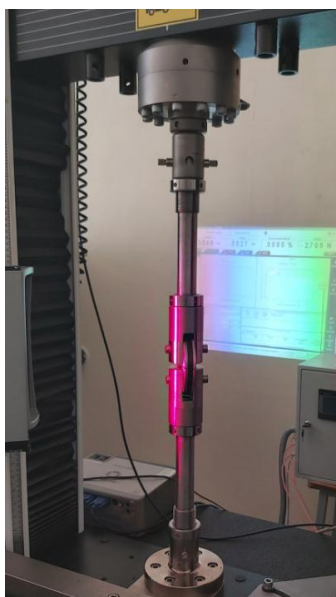


Рис. 10. Оснастка для испытаний на растяжение кольцевых образцов

Изгиб образцов проводится на установке с максимальной нагрузочной способностью 10 кН, в результате чего предел прочности на изгиб не достигнут.

Исследования, проведенные на плоских образцах, позволили получить упругие свойства ПКМ для проведения численного моделирования композитных деталей электрических машин. Для уточнения предела прочности и оптимизации технологического режима изготовления композитных деталей проводятся испытания кольцевых образцов.

Проведено исследование влияния силы натяжения углеволокна на механические характеристики. Установлено, что повышение силы натяжения благоприятно сказывается на механических характеристиках ПКМ, а также создает необходимое давление на постоянные магниты, предотвращая их отрыв от поверхности магнитопровода.

Результаты испытаний на растяжение кольцевых образцов сильно зависят от таких факторов, как степень пропитки связующим, температура оснастки (или ротора) при намотке, температурный режим постотверждения.

На рис. 11 – 14 представлены кольцевые образцы после разрушения при растяжении с различным характером разрушения.



Рис. 11. Образец 43 после разрушения



Рис. 12. Образец 45 после разрушения

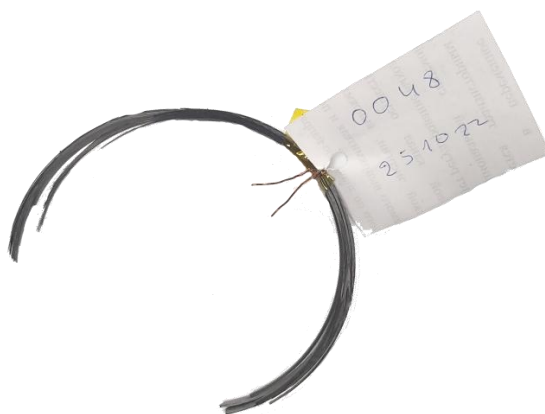


Рис. 13. Образец 48 после разрушения

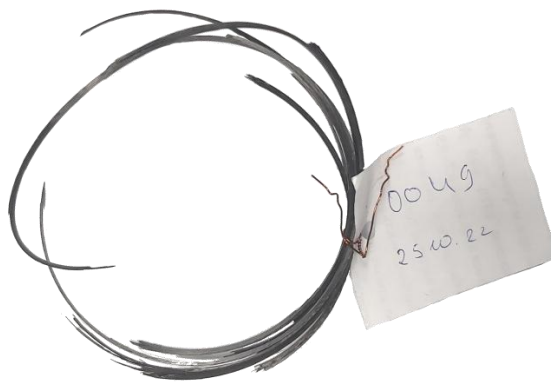


Рис. 14. Образец 49 после разрушения

Разрушение образца №43 на рис. 11 произошло при растягивающем напряжении 790 МПа, при этом разрыв произошел поперек волокон по всей ширине. Такое разрушение вероятнее связано с наличием геометрического дефекта в образце.

Разрушение образца №45 на рис. 12 произошло при растягивающем напряжении 1290 МПа. Характер разрушения представляет собой расслоение

вдоль волокон (по окружности) и дальнейшее ступенчатое разрушение не расслоившихся волокон.

Разрушение образца №48 на рис. 13 произошло при растягивающем напряжении 1450 МПа. Разрушение произошло в трех и более сечениях (секторах) поперек практически всех волокон по ширине. Разрушение в образце №48 произошло при более высоких напряжениях в одном сечении после чего прошла обратная «волна» деформаций и привела к разрушению образца от изгиба еще в двух и более сечениях.

Разрушение образца №49 на рис. 14 произошло при растягивающем напряжении 1650 МПа. Разрушение образца при высоких растягивающих напряжениях характеризуется расслоением части волокон и разрушением поперек волокон.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе проведения исследования определены упругие свойства углепластикового бандажа для ЭМ с ПМ на основе углеродного волокна UMT530-12K EP и связующего TO200 по результатам испытаний плоских образцов при комнатной и повышенной температуре работы. Высокомодульное волокно обеспечивает в углепластике модуль упругости 250 ГПа.

Для определения предела прочности углепластикового бандажа проводятся дополнительные испытания кольцевых образцов. В ходе испытаний кольцевых образцов достигнут стабильный предел прочности при растяжении при 160°C 1400 МПа. При этом ряд образцов продемонстрировали высокие показатели — 1750-2100 МПа. Дальнейшее исследование и оптимизация технологии изготовления должно позволить достигнуть стабильных показателей минимум 1800 МПа. Обеспечение условий для равномерной работы волокон по всему объему даст повышение уровня предела прочности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Старков А. И., Кацевич К. Е., Тюменева Т. Ю. Разработка композиционного материала клеевого на основе альтернативного углеродного жгутового наполнителя марки umt49s-12кер и клеевого связующего марки вск-14-3 //Труды ВИАМ. – 2020. – №. 6-7 (89). – С. 62-71.
2. Гуняева А. Г. и др. Полимерные композиционные материалы нового поколения на основе связующего ВСЭ-1212 и наполнителей, альтернативных наполнителям фирм Porcher Ind.. И Toho Tenax //Авиационные материалы и технологии. – 2018. – №. 3 (52). – С. 18-26.
3. Старцев В. О., Славин А. В. Стойкость углепластиков и стеклопластиков на основе расплавных связующих к воздействию умеренно холодного и умеренно теплого климата //Труды ВИАМ. – 2021. – №. 5 (99). – С. 114-126.
4. Бондалетова Л.И. Полимерные композиционные материалы (часть 1): учебное пособие / Л.И. Бондалетова, В.Г. Бондалетов. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2013. – 118 с.
5. Сироткин О. С., Андрюнина М. А., Бейдер Э. Я. Новые конструкционные и функциональные ПКМ на основе термопластов и технологии их формования //Авиационная промышленность. – 2012. – №. 4. – С. 43-47.
6. Бейдер Э. Я., Петрова Г. Н. Термопластичные связующие для полимерных композиционных материалов //Труды виам. – 2015. – №. 11. – С. 38-47.
7. Гращенков Д. В., Чурсова Л. В. Стратегия развития композиционных и функциональных материалов //Авиационные материалы и технологии. – 2012. – №. 5. – С. 231-242.
8. Петрова А. П. и др. Клеевые связующие для полимерных композиционных материалов на угле-и стеклонанополнителях //Труды ВИАМ. – 2015. – №. 9. – С. 84-91.
9. Николаев Е. В. и др. Комплексное исследование воздействия климатических и эксплуатационных факторов на новое поколение эпоксидного связующего и полимерных композиционных материалов на его основе часть 1. Исследование влияния сорбированной влаги на эпоксидную матрицу и углепластик на ее основе //Труды ВИАМ. – 2015. – №. 12. – С. 84-97.

Баранов Г. Д.¹, Демидова Г. Л.¹, Лукичев Д. В.¹, Поляков Н. А.¹, Ваганов М. А.²

¹Университет ИТМО

²СПбГЭТУ «ЛЭТИ»

ВЛИЯНИЕ ДЕФЕКТОВ КОРОТКОЗАМКНУТОГО РОТОРА АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ НА МДС РОТОРА И ТОК СТАТОРА

Аннотация: Для идентификации неисправностей в электротехнических системах в настоящее время используют спектральный анализ электромагнитных или вибрационных характеристик. Наибольшую ценность при идентификации неисправности представляет спектральный анализ и гармоники, часто с небольшой амплитудой, частота которых является определяющей в выявлении той или иной поломки. Данная статья посвящена разработке математической модели магнитодвижущей силы асинхронного двигателя при наличии повреждения в стержне ротора. Теоретически полученные результаты подтверждены моделированием с помощью метода конечных элементов и экспериментальными результатами.

Ключевые слова: спектральный анализ, неисправности, асинхронный двигатель, дефект ротора

I. ВВЕДЕНИЕ

Основную долю электрических машин, использующихся в производственных процессах предприятий и технологических установках, составляют асинхронные машины. В связи с этим интерес исследователей к идентификации неисправностей асинхронных электрических машин не ослабевает. Развитие технологии цифровых двойников также подстегнуло интерес исследователей к математическому описанию различных неисправностей в технических устройствах. Согласно [1] основные неисправности в асинхронных электрических машинах подразделяются на внутренние и внешние. К внешним относятся неисправности в силовом полупроводниковом преобразователе, что ведет за собой изменение и искажение питающего напряжения, появление седьмой гармоники в сигнале; возможную разбалансировку двигателя. К внутренним неисправностям можно отнести разрушение подшипников или в процессе работы, или в связи с дефектами изготовления, что ведет за собой увеличение вибрации в диапазоне частот от 2 до 60 кГц; а также разрушение стержней ротора, что достаточно трудно обнаружить в связи с малой амплитудой гармоник.

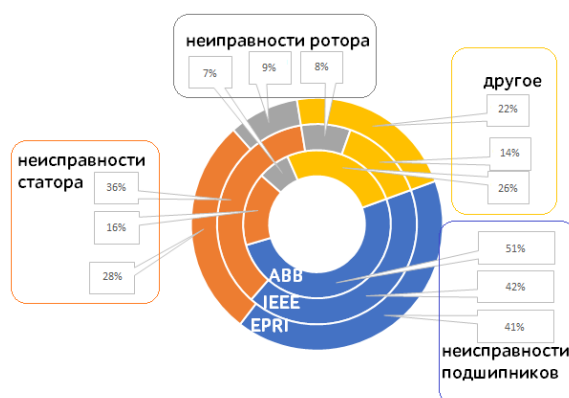


Рис. 1. Процент места возникновения неисправностей в асинхронных электрических машинах по версии АВВ, IEEE и EPRI

На рис. 1 представлено процентное соотношение вероятности возникновения неисправности по оценкам различных источников, таких как фирма АВВ, по итогам рассмотрения публикаций в The Institute of Electrical and

Electronics Engineers (IEEE) и согласно оценкам Electric Power Research Institute (EPRI). Видно, что общий характер диаграмм сопоставим и наибольший процент неисправностей возникает в подшипниках, вероятность неисправности в статоре асинхронной машине сопоставима с внешними неисправностями, в частности, в силовом преобразователе и порядка 8% составляют неисправности в роторе асинхронной машины. В связи с тем, что в настоящее время научный интерес направлен на идентификацию неисправностей в подшипниках [2,3] в области детектирования неисправностей широко распространяются методы машинного обучения [4,5], нечеткой логики [6], с применением нейронных сетей [7-9] и даже акустические [10] и тепловые [11,12] методы. Однако для выявления неисправности ротора, в связи с малой амплитудой сигналов наиболее предпочтительны методы спектрального анализа с применением преобразования Фурье [13-14]. Типовая структурная схема идентификации неисправности с применением спектрального анализа приведена на рис.2. Показано, что в основе этого метода лежит анализ маркеров сигнала для дальнейшей обработки и принятия решения о дальнейшем управлении объектов с учетом выявленной неисправности.

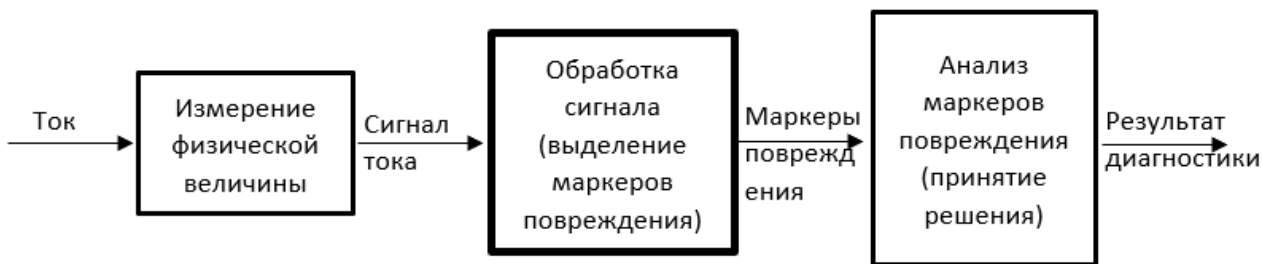


Рис. 2. Блок-схема токовой диагностики

II. АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ ДЕФЕКТА ОБМОТКИ РОТОРА

Н. МДС обмотки ротора

Для описания распределения токов, создаваемых проводниками обмотки ротора, можно использовать обмоточную функцию $N(\theta)$, как предлагается в [15].

$$N(\theta) = \begin{cases} N \left(1 - \frac{\alpha}{2\pi}\right) & \theta \in [\theta_1; \theta_2] \\ -N \frac{\alpha}{2\pi} & \theta \in [0; \theta_1) \cup (\theta_2; 2\pi] \end{cases} \quad (1)$$

где N - число витков обмотки, а α шаг обмотки, θ - механический угол. Два стержня короткозамкнутой обмотки ротора создают элементарный виток. Если всю обмотку представить, как суперпозицию элементарных витков, то шаг такой обмотки будет $\alpha = 2\pi/Z_2$, где Z_2 число пазов ротора. С учетом этого выражение (1) для первого витка можно представить как:

$$N_1(\theta) = \begin{cases} 1 - \frac{1}{Z_2} & \theta \in \left[-\frac{\pi}{Z_2}; \frac{\pi}{Z_2}\right] \\ -\frac{1}{Z_2} & \theta \in \left[-\pi; \frac{\pi}{Z_2}\right) \cup \left(\frac{\pi}{Z_2}; \pi\right] \end{cases}$$

Для удобства дальнейшей работы с обмоточной функцией найдем ее разложение в ряд Фурье

$$N_1(\theta) = \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{2}{\mu\pi} \sin\left(\mu \frac{\pi}{Z_2}\right) \cos(\mu\theta) \quad (2)$$

Поскольку в исправной обмотке ротора обмоточная функция каждого k -го витка будет опережать следующую по фазе на $k\alpha = 2\pi k/Z_2$ можем получить обмоточную функцию k -го витка фазы обмотки ротора.

$$N_k(\theta) = \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{2}{\mu\pi} \sin\left(\mu \frac{\pi}{Z_2}\right) \cos\left(\mu \frac{2\pi}{Z_2} k - \mu\theta\right) \quad (3)$$

Тогда обмоточная функция всей обмотки ротора

$$N_k(\theta) = \sum_{k=1}^{Z_2} \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{2}{\mu\pi} \sin\left(\mu \frac{\pi}{Z_2}\right) \cos\left(\mu \frac{2\pi}{Z_2} k - \mu\theta\right) \quad (4)$$

Ток i -й фазы ротора определяемый потоком взаимной индукции

$$I_{r,v}(t) = I_{r,v,m} \cos\left(s_v \omega_1 t + v \frac{2\pi p}{Z_2} k\right) \quad (5)$$

Тогда МДС фазы ротора

$$F(t, \theta) = I_{r,v}(t) N_2(\theta) \quad (6)$$

I. МДС обмотки ротора с одним поврежденным стержнем

Повреждением будем считать полный выход из строя $n-1$ стержней короткозамкнутой обмотки начиная с $j+1$ -го. В этом случае обмоточная функция для j -го элементарного витка будет:

$$N_j(\theta) = \sum_{\mu=1}^{\infty} \frac{2}{\mu\pi} \sin\left(\mu \frac{\pi}{Z_2} n\right) \cos\left(\mu \frac{2\pi}{Z_2} (j+n) - \mu\theta\right) \quad (7)$$

Ток в этом контуре будет определяться выражением

$$I_{r,v}^j(t) = I_{r,v,m} \cos\left(s_v \omega_1 t + n \frac{2\pi p}{Z_2} (j + (n-1)/2)\right) \quad (8)$$

Тогда МДС такой обмотки ротора будет

$$F(t, \theta) = I_{r,v}(t) \left(\sum_{k=1}^{j-1} N_k(\theta) + \sum_{k=1+n-1}^{Z_2} N_k(\theta) \right) + I_{r,v}^j(t) N_j(\theta) \quad (9)$$

На рис. 3 приведены МДС ротора для случая отсутствия повреждений и с повреждениями одного стержня ротора. Приведенное уравнение (9) записано в пространственных координатах, сцепленных с ротором. В случае, если мы наблюдаем процесс из неподвижной точки, сцепленной со статором, то угловое положение МДС ротора $\theta = t\omega_1/p$. Тогда можно определить МДС ротора как функцию времени (10).

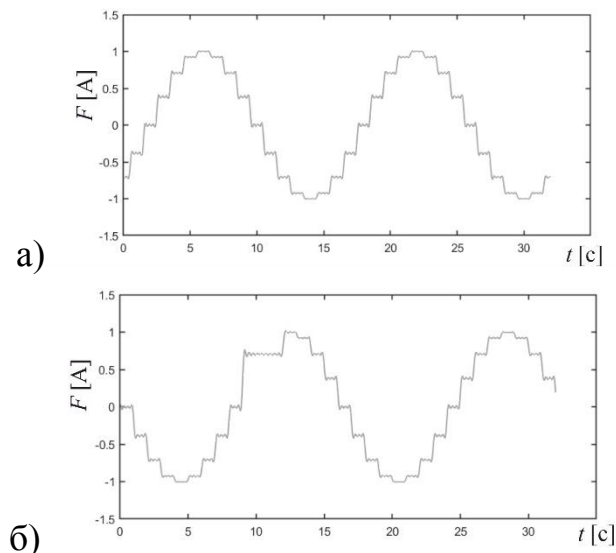


Рис. 3. Ступенчатая волна МДС ротора в воздушном зазоре:
a – без повреждений; *б* – при одном поврежденном стержне

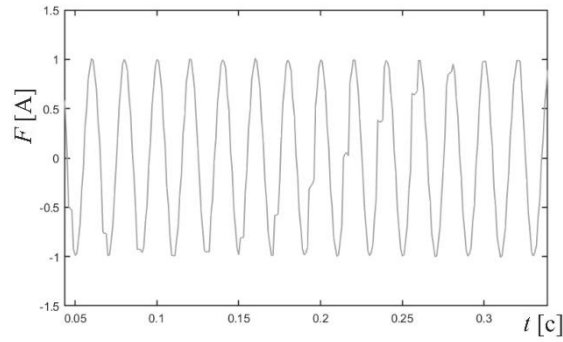


Рис. 4. Ступенчатая волна МДС ротора в воздушном зазоре при одном поврежденном стержне в подвижной системе координат

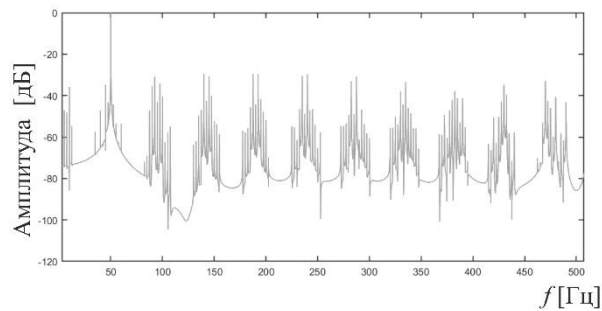


Рис. 5. Спектральный состав МДС ротора в воздушном зазоре при одном поврежденном стержне

$$F(t) = I_{r,v}(t) \left(\sum_{k=1}^{j-1} N_k(t\omega_1/p) + \sum_{k=1+n-1}^{Z_2} N_k(t\omega_1/p) \right) + I_{r,v}^j(t) N_j(t\omega_1/p) \quad (10)$$

Численный расчет $F(t)$ дает кривую, представленную на рис.4. со спектральным составом, представленным на рис.5.

Ж. МДС обмотки ротора с двумя поврежденными стержнями

По аналогии с выводом выражения (10) можно получить выражение для МДС обмотки ротора с двумя поврежденными стержнями с номерами $j1$ и $j2$. В этом случае $n = 2$ и обмоточная функция для каждого витка обмотки ротора, соответствующего из поврежденным стержням, определяется по выражению (7). В этом случае МДС обмотки ротора будет определяться выражением:

$$F(t, \theta) = I_{r,v}(t) \left(\sum_{k=1}^{j_1-1} N_k(\theta) + \sum_{k=j_1+1}^{j_2-1} N_k(\theta) + \sum_{k=j_2+1}^{Z_2} N_k(\theta) \right) + I_{r,v}^{j_1}(t) N_{j_1}(\theta) + I_{r,v}^{j_2}(t) N_{j_2}(\theta) \quad (11)$$

III. МОДЕЛИРОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С ДЕФЕКТОМ СТЕРЖНЯ РОТОРА

Моделирование повреждений стержней ротора производилось путем уменьшения их активных сечений. На рис. 6 представлена модель двигателя 4A132S4 с поврежденным на 25% стержнем ротора. Для повреждения производился расчет установившегося состояния машины в режиме *Transient*. Результатом моделирования являлся ток фазы статора.

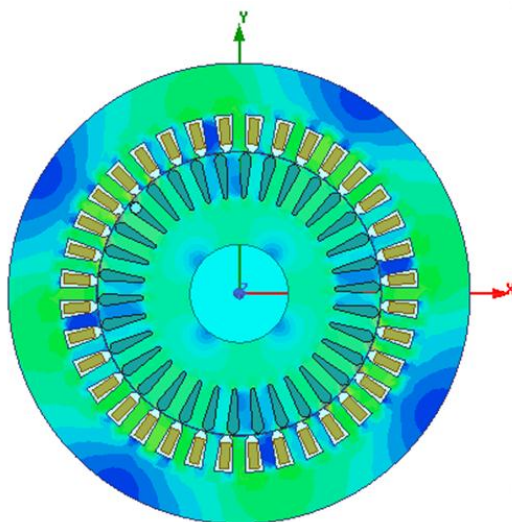


Рис. 6. Модель двигателя 4A132S4 с поврежденным на 25% стержнем ротора

Далее полученный ток обрабатывался алгоритмом спектрального анализа [16]. На работу алгоритма влияет наличие шума вблизи основной гармоники, поэтому можно наблюдать скопление гармоник в этой области. В процессе анализа они не учитывались. Спектр тока для удобства сопоставления приводится в децибелах, нормированных относительно уровня основной гармоники. Переходные процессы для изучения характеристик токов двигателя производились с применением метода конечных элементов.

Первая серия экспериментов с моделью была направлена на моделирование процесса износа стержня короткозамкнутой обмотки ротора. Для этого его сечение уменьшалось на 25, 50 и 100%. Во всех опытах скольжение поддерживалось равное $s = 0.05$. Моделирование выполнялось с шагом по времени в 0.1 мс. Для получения приемлемого шага спектра

по частоте моделировалась работа двигателя в течение не менее 60 с после завершения переходного процесса.

На рис. 7 представлены спектры тока фазы статора при различной степени износа стержня. Как видно износ стержня сопровождается ростом определенных частот спектра тока фазы обмотки статора. Так наибольший рост амплитуды наблюдается на частотах 45, 240, 330, 525, 615, 810, 900 Гц. Каждая из перечисленных частот имеет группу побочных частот, также отличившихся ростом, но их амплитуда уступает первым

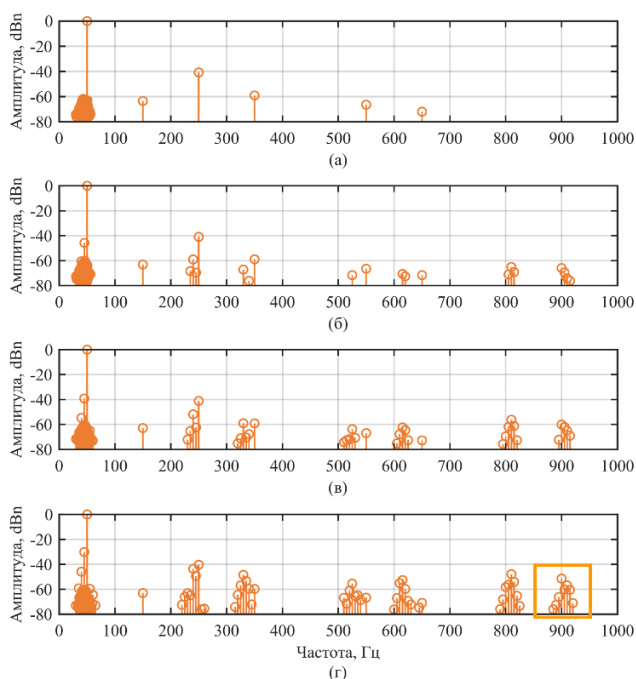


Рис. 7. Спектры тока фазы статора при различной степени износа стержня: (а) полностью исправная беличья клетка; (б) повреждение 25% сечения стержня; (в) повреждение 50% сечения стержня; (г) повреждение 100% сечения стержня

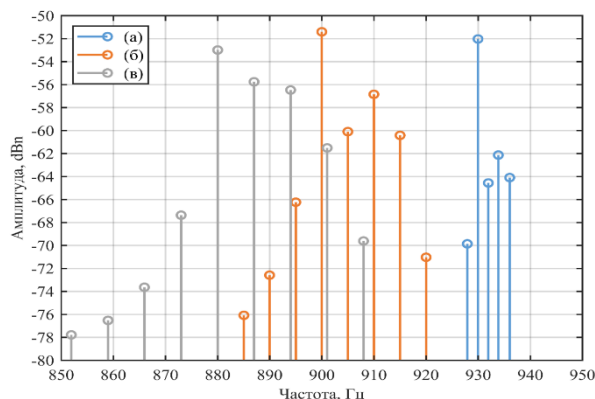


Рис. 8. Спектр тока статора при полностью неисправном стержне ротора и при различных значениях скольжения ротора

Из полученного массива гармоника описывается выражением $f = f_1(1-2s) = 50(1-2 \cdot 0.05) = 45$ Гц. Для описания остальных гармоник моделирование двигателя с одним полностью поврежденным стержнем, было произведено при нескольких значениях скольжения $s = 0.02, 0.05$ и 0.07 .

Проводя аналогию с выражением для референтной частоты близ основной гармоники спектра $f = f_1(1-2s)$ возможно сделать вывод, что обозначенные частоты в общем случае имеют вид:

$$\begin{cases} f = f_1(v - (v + \alpha)s) & v = 1, 7, 13, 19... \\ f = f_1(v - (v - \alpha)s) & v = 5, 11, 17... \end{cases} \quad \alpha = \dots -3, -1, 1, 3, 5... \quad (12)$$

где f_1 - частота питающей сети, v - целочисленный коэффициент, соответствующий порядковому номеру вращающихся пространственных гармоник МДС статора, α - целочисленный коэффициент, принимающий нечетные значения, связанный с номерами гармоник тока статора.

Частоты, описываемые выражением (12), можно разделить на семь групп, в каждой из которых можно выделить одну базовую частоту, имеющую наибольшую амплитуду ($\square = 1$) и ряд второстепенных расположенных рядом с базовой. Группы формируются исходя из значения коэффициента v соответствующего номерам прямо или обратно вращающихся пространственных гармоник МДС обмотки статора. Так гармоники 7, 13, 19 вращаются согласно с первой и относятся к прямо-вращающимся, а гармоники 5, 11, 17 вращаются встречно и относятся к обратно-вращающимся.

В таблице 1 приведены значения частот, определенных по формуле (12), для каждой из семи групп гармоник. Оранжевым цветом выделены гармоники для, которых характерен рост амплитуды при моделировании обрыва двух последовательных стержней рис. 8а. Следует отметить, что обнаруженная закономерность проявляется и для $v > 19$, но в этой работе мы ограничиваемся выбранным диапазоном частот поскольку моделирование показало, что амплитуды более высокочастотных гармоник малы. Референтные частоты в Герцах, определенные по формуле (12) приведены для скольжения $s = 0.05$.

Референтные частоты (Гц)

ν	1	5	7	11	13	17	19
-11	75	210	360	495	645	780	930
-9	70	215	355	500	640	785	925
-7	65	220	350	505	635	790	920
-5	60	225	345	510	630	795	915
-3	55	230	340	515	625	800	910
-1	50	235	335	520	620	805	905
1	45	240	330	525	615	810	900
3	40	245	325	530	610	815	895
5	35	250	320	535	605	820	890
7	30	255	315	540	600	825	885
9	25	260	310	545	595	830	880
11	20	265	305	550	590	835	875

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Для верификации гипотезы было проведено экспериментальное исследование с применением двигателя АИР71В4У, отличающегося от моделируемого.

Экспериментальная установка содержит в своем составе двухмашинный агрегат состоящий из асинхронного двигателя (АД) и электромагнитного тормоза (ЭМТ). Двухмашинный агрегат ЭМТ – АД, позволяет имитировать номинальное состояние работы АД, а также режим перегрузки. Для контроля тормозного момента ЭМТ используется блок управления электромагнитным тормозом БИ1 СКБ (А1). К двигателю АИР71В4У2 подключена система датчиков, состоящая из трех датчиков тока ТТ1-ТТ3, подключенных в фазы питания АД, а также датчика скорости XD-51 размещенного на ЭМТ. Для выбора измерительного оборудования был проанализирован опыт других исследователей. Так для измерения тока в [17] применялись Hall Effect Base Linear Current Sensors WCS6800, в [18], [19] токовые пробники Tektronix A621, в [20] трансформатор тока, а в [21] - токовые клещи i200s Fluke. Токовые клещи Fluke i200s имеют ограничения по частоте 40 Гц - 10 кГц, а Tektronix A621 ограничены диапазоном частот 5 Гц - 50 кГц. Поскольку диапазон частот 0–10 Гц важен для изучения процессов, связанных с механикой двигателя [22], было

принято решение использовать датчики, основанные на эффекте Холла - LTS25-NP LEM 0 Гц - 100 кГц.

Сбор показаний с датчиков осуществляется через блок аналоговых вводов-выводов SCB-68A (A2). Сигналы поступают на блок 16-разрядной АЦП NI PXI-6123 (A5), где они оцифровываются с частотой дискретизации 10 кS/s. Далее оцифрованный сигнал обрабатывается и записывается в файл при помощи блока NI PXI-8106 (A4) и ПО LabView. Аналогичный подход использовали исследователи в [23 и 24], но применяемые ими решения NI DAQ 9230 и NI-USB 6211 имели низкую разрешающую способность по частоте 12,8 кВыб/с/канал и 250 кВыб/с. Предлагаемая система позволяет осуществлять измерения с частотой до 500 кВыб/с.

Структурная схема стенда макетирования измерительного прибора представлена на рис. 9.

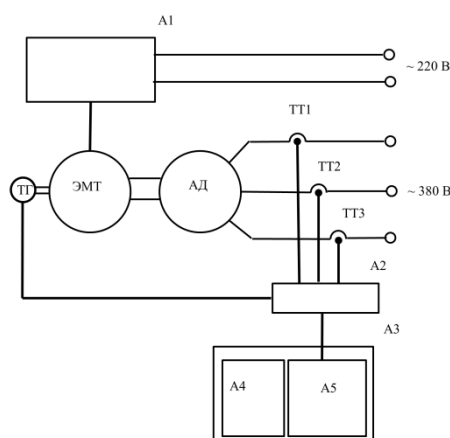


Рис. 9. Структурная схема стенда

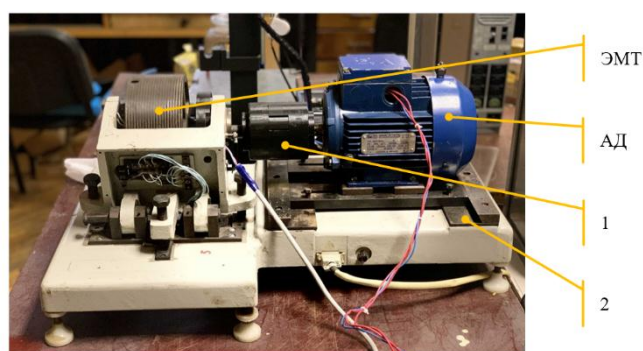


Рис. 10. Механическая часть стенда



Рис. 11. Ротор исследуемого двигателя с повреждением двух стержней

Механическая часть стенда, представленная на рис.10, состоит из асинхронного двигателя (АД) и электромагнитного тормоза (ЭМТ). Обе электрические машины находятся на жесткой раме, которая в свою очередь через демпфирующую прослойку опирается на массивную опору. ЭМТ соединен непосредственно с рамой, в то время как АД располагается на дополнительной платформе (2), которая может иметь два состояния. Первое состояние – жесткое закрепление на раме, второе – свободное перемещение в аксиальной плоскости. Такой способ монтажа позволяет без демонтажа, и, следовательно, изменения расположения машины в пространстве при последующем монтаже, проводить расчленение двухмашинного агрегата. Электрические машины сочленены при помощи кулачковой муфты (1). Такой способ сочленения обусловлен необходимостью перемещать двигатель в аксиальной плоскости при осуществлении введения дефекта. Ротор исследуемого двигателя представлен на рис.11.



Рис. 12. Система управления экспериментального стенда

Основные узлы электрической схемы стенда собраны в силовом блоке (СБ), представленном на рис. 12. Измерительные устройства, собранные в СБ, представляют собой макет измерительной системы разрабатываемого прибора.

Из лабораторного распределительного щитка (РШ) в СБ подводится трехфазное напряжение по схеме N PE. Через автоматический выключатель QF1 напряжение поступает датчики тока LTS25-NP и далее на пускатель KM1. К пускателю, непосредственно, подключен АД. Параллельно силовой цепи расположена цепь измерения напряжения. Модуль измерения напряжения разработан на базе LV-25p. Дополнительно на узел аналогового ввода с ТГ подается сигнал скорости.

Для проведения испытаний системы токовой диагностики асинхронных двигателей необходимо программное обеспечение (ПО), позволяющее в режиме реального времени контролировать такие величины, как потребляемый двигателем ток и скорость вращения вала двигателя. А также рассчитывать величину скольжения машины и производить запись контролируемых величин в файл с заданной частотой дискретизации (10кГц) и заданной периодичностью измерения. ПО реализовано в среде разработки LabView. Для сбора данных с аналоговых входов создается виртуальный канал DAQmx. Виртуальный канал позволяет получить оцифрованные значения аналогового напряжения. Далее настраивается тактовый генератор самого регистратора.

Для имитации постепенного выхода из строя стержня ротора было произведено искусственное сокращение его проводящего сечения. Для минимизации разбалансировки ротора в следствии удаления части материала, введение дефекта было принято производить в месте контакта короткозамыкающего кольца и стержня ротора.

Экспериментальные результаты полученного спектра представлены на рис. 13. Эксперименты с незначительным повреждением ротора не привели к заметным изменениям в спектре тока. Первые заметные изменения возникли при полном обрыве одного стержня. Спектральный состав токов для этого случая можно найти на рисунке рис.8б. При полном выходе из строя двух

стержней наблюдаются уже существенные изменения в спектре на рисунке рис.8в. Видно, что экспериментальные данные имеют ту же корреляцию, что и имитационные.

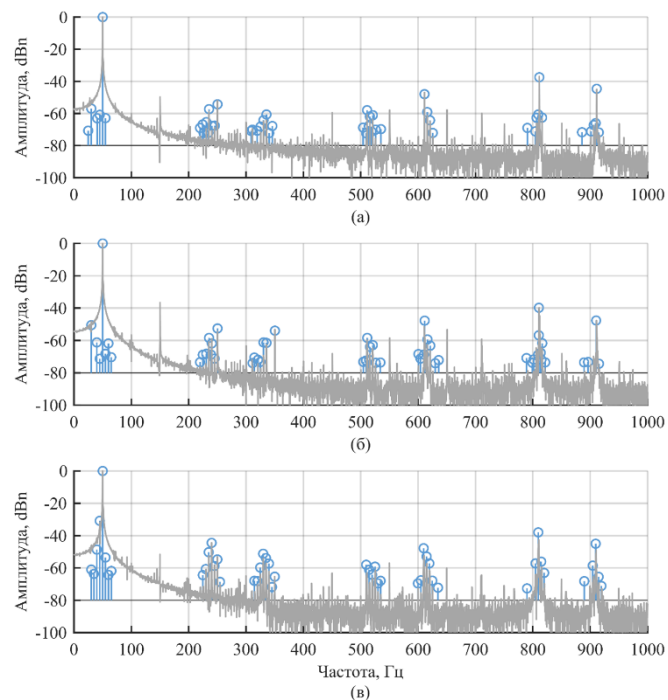


Рис. 13. Спектр тока статора при различной степени повреждения ротора: (а) исходное состояние ротора; (б) повреждение 100\% сечения стержня; (в) повреждены 2 стержня на 100% сечения

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном исследовании синтезирована математическая модель асинхронного двигателя, позволяющая рассчитывать МДС ротора при наличии его повреждения. Математическая модель основана на описании ступенчатой волны МДС обмотки короткозамкнутого ротора с поврежденным стержнем. Моделирование асинхронного двигателя с дефектом обмотки ротора с применением методов конечных элементов показало сопоставимые результаты с теоретической моделью. Также экспериментальные результаты показали наличие тех же гармоник тока, что и при имитационном моделировании. Представленная математическая модель имеет большую практическую значимость и может быть использована для тестирования диагностических систем или при создании обучающего материала для отработки новых алгоритмов диагностики ротора.

Приложение

Таблица П1

Паспортные данные АД 4А132S4

Наименование параметра	Значение
Мощность	3 кВт
Частота вращения	1500 об/мин
Ток статора при 380В	6,8 А
КПД	82 %
cos φ	0,83
Крутящий момент	2,2 Н·м

Таблица П2

Паспортные данные АИР71В4У

Наименование параметра	Значение
Мощность	0,75 кВт
Частота вращения	1390 об/мин
Ток статора при 380В	2,05 А
КПД	73 %
cos φ	0,76
Ип/In	6
Мп/Мн	2,3
Мтах/Мн	2,3
Крутящий момент	5,15 Н·м
Момент инерции	0,0015 кг·м ²

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Anurag Choudhary, Deepam Goyal, Sudha Letha Shimi & Aparna Akula. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review// Archives of Computational Methods in Engineering volume 26, pages1221–1238 (2019)
2. Kudelina, K.; Baraškova, T.; Shirokova, V.; Vaimann, T.; Rassõlkin, A. Fault Detecting Accuracy of Mechanical Damages in Rolling Bearings. Machines 2022, 10, 86. <https://doi.org/10.3390/machines10020086>
3. Сафин Н.Р., Прахт В.А., Дмитриевский В.А., Смольянов И.А. Токовая диагностика подшипников асинхронных двигателей на основе вейвлет-анализа и задачи энергоресурсосбережения // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2014. – № 1. – С. 72–80.

4. B. D. E. Cherif, M. Chouai, S. Seninete and A. Bendiabdellah, "Machine-Learning-Based Diagnosis of an Inverter-Fed Induction Motor," in *IEEE Latin America Transactions*, vol. 20, no. 6, pp. 901-911, June 2022, doi: 10.1109/TLA.2022.9757372.
5. W. Lang, Y. Hu, C. Gong, X. Zhang, H. Xu and J. Deng, "Artificial Intelligence-Based Technique for Fault Detection and Diagnosis of EV Motors: A Review," in *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 8, no. 1, pp. 384-406, March 2022, doi: 10.1109/TTE.2021.3110318.
6. M. A. Eissa, A. Sali, F. A. Ahmad and R. R. Darwish, "Observer-Based Fault Detection Approach Using Fuzzy Adaptive Poles Placement System With Real-Time Implementation," in *IEEE Access*, vol. 9, pp. 83272-83284, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3086040.
7. F. Husari and J. Seshadrinath, "Stator Turn Fault Diagnosis and Severity Assessment in Converter Fed Induction Motor Using Flat Diagnosis Structure Based on Deep Learning Approach," in *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, 2022, doi: 10.1109/JESTPE.2022.3184754.
8. J. Wang, P. Fu, S. Ji, Y. Li and R. X. Gao, "A Light Weight Multisensory Fusion Model for Induction Motor Fault Diagnosis," in *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, doi: 10.1109/TMECH.2022.3169143.
9. M. -Q. Tran, M. -K. Liu, Q. -V. Tran and T. -K. Nguyen, "Effective Fault Diagnosis Based on Wavelet and Convolutional Attention Neural Network for Induction Motors," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-13, 2022, Art no. 3501613, doi: 10.1109/TIM.2021.3139706.
10. G. B. Lucas, B. A. de Castro, M. A. Rocha and A. L. Andreoli, "A New Acoustic Emission-Based Approach for Supply Disturbances Evaluation in Three-Phase Induction Motors," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, pp. 1-10, 2021, Art no. 3508410, doi: 10.1109/TIM.2020.3047492.
11. Z. Xu, G. Tang and B. Pang, "An Infrared Thermal Image Few-Shot Learning Method Based on CAPNet and Its Application to Induction Motor Fault Diagnosis," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 16, pp. 16440-16450, 15 Aug.15, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3192300.
12. J. de Pelegrin, U. J. Dreyer, J. P. Bazzo and J. C. C. d. Silva, "Faults Diagnosis in Induction Motors Through Thermal Mapping Produced by the RDTS System," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 18, pp. 20061-20068, 15 Sept.15, 2021, doi: 10.1109/JSEN.2021.3097940.
13. M. Hoseintabar Marzebali, R. Bazghandi and V. Abolghasemi, "Rotor Asymmetries Faults Detection in Induction Machines Under the Impacts of Low-Frequency Load Torque Oscillation," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 71, pp. 1-11, 2022, Art no. 3522011, doi: 10.1109/TIM.2022.3201950.
14. C. G. Dias and L. C. d. Silva, "Induction Motor Speed Estimation Based on Airgap Flux Measurement Using Hilbert Transform and Fast Fourier Transform," in *IEEE Sensors Journal*, vol. 22, no. 13, pp. 12690-12699, 1 July1, 2022, doi: 10.1109/JSEN.2022.3176085.
15. Joksimovic, G. Cage rotor MMF: winding function approach / G Joksimovic, M Djurovic, J Penman // *IEEE Power Engineering Review*. — 2001. — Vol. 21, no. 4. — Pp. 64–66
16. Haynes, Howard D. Motor current signature analysis method for diagnosing motor operated devices. — 1990. — 23. — US Patent 4,965,513
17. Rohan, Ali. Rotate vector (RV) reducer fault detection and diagnosis system: towards component level Prognostics and Health Management (PHM) / Ali Rohan, Izaz Raouf, Heung Soo Kim // *Sensors*. —2020. — Vol. 20, no. 23. — P. 6845.
18. Airgap flux based detection and classification of induction motor rotor and load defects during the starting transient / Yonghyun Park, Hanchun Choi, Jaehoon Shin et al. // *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. — 2020. — Vol. 67, no. 12. — Pp. 10075–10084
19. Pradhan, Prasanta Kumar. Detection of broken impeller in submersible pump by estimation of rotational frequency from motor current signal / Prasanta Kumar Pradhan, SK Roy, AR Mohanty // *Journal of Vibration Engineering & Technologies*. — 2020. — Vol. 8, no. 4. — Pp. 613–620

20. Zhao, Shuanfeng. Study on the fault diagnosis method of scrap er conveyor gear under time-varying load condition / Shuanfeng Zhao, Pengfei Wang, Shijun Li // Applied Sciences. — 2020. — Vol. 10, no. 15. — P. 5053.
21. Convolutional neural network and motor current signature analysis during the transient state for detection of broken rotor bars in induction motors / Martin Valtierra-Rodriguez, Jesus R Rivera-Guillen, Jesus A Basurto-Hurtado et al. // Sensors. — 2020. — Vol. 20, no. 13.— P. 3721.
22. Thomson, William T. Motor current signature analysis for induction motors / William T Thomson, Ian Culbert // Current signature analysis for condition monitoring of cage induction motors: industrial application and case histories. — 2016. — Pp. 1–37.76
23. Малафеев, Сергей Иванович. Надежность технических систем / Сергей Иванович Малафеев, Анатолий Иванович Копейкин. — Лань, 2012.
24. Haynes, HD. Application of signature analysis for determining the operational readiness of motor-operated valves under blowdown test conditions / HD Haynes // Nuclear engineering and design. — 1990. —Vol. 118, no. 3. — Pp. 399–408.

Демидова Г. Л., Баранов Г. Д., Лукин А. Е., Алассаф О., Лукичев Д. В.
Университет ИТМО

ОБЗОР МЕТОДОВ ИДЕНТИФИКАЦИИ НЕИСПРАВНОСТЕЙ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМ С ПРИМЕНЕНИЕМ МЕТОДОВ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Аннотация: С развитием технологий цифровых двойников таких систем как электромобили, ветроэнергоустановки, насосные станции, электроэнергетические системы в целом и электрические машины в частности, развиваются методы идентификации неисправностей. Методы идентификации неисправностей позволяют уменьшить экономические потери, уменьшить потери энергии, увеличить производительность систем за счет своевременного реагирования и предсказания аварийной ситуации. Часто в таких системах требуется или проведение серии экспериментов, или строгий математический синтез имитационной модели отказа. Применение алгоритмов нечеткой логики, основанной на экспертных логических знаниях, позволяет избежать дополнительных расходов на экспериментальные исследования и временных затрат на обработку данных. В данной статье приведен обзор принципов проектирования алгоритмов с применением нечеткой логики для обнаружения неисправностей, позволяющих повысить надежность электроэнергетических систем.

Ключевые слова: нечеткая логика, диагностика неисправностей, неисправности.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время устройства преобразования энергии разрабатываются с учетом энергоэффективности, экономической эффективности, надежности, доступности обслуживания и безопасности использования. Современные электроэнергетические системы также часто проектируются с применением технологий цифровых двойников, с удаленным управлением в парадигме распределенных сетей. Обнаружение неисправностей в таких устройствах является нетривиальной, однако необходимой задачей.

Исследователи в работе [1] сгруппировали подходы к идентификации неисправностей на два типа: с использованием пассивного и активного подходов. Пассивный подход заключается в создании замкнутых систем управления, нечувствительных к сбоям оборудования. При применении такого подхода системы могут сохранять свою работоспособность при незначительных дефектах. При активной стратегии система управления перестраивается при выявлении сбоев. Такие методы применяются, когда неисправности становятся критическими. В данной статье используются термины и определения согласно ГОСТ Р 27.002-2009 и [2], и могут быть кратко представлены в виде следующих определений. *Неисправность* – недопустимое отклонение одного из параметров системы от допустимого или нормативного; *Отказ* – необратимое повреждение устройства без возможности обеспечения требуемых операций; *Неисправность* – неравномерное отклонение в желаемом процессе; *Ошибка* – разница между измеренным или вычисленным значением выходной переменной и ее истинным значением; *Обнаружение неисправностей* – процесс обнаружения неисправностей в системе; *Локализация отказов* – процесс обнаружения, идентификации типа неисправностей, запись времени возникновения неисправностей, локализация неисправности, срабатывает после обнаружения неисправности; *Идентификация неисправностей* – процесс обнаружения сущностей неисправностей; *Диагностика неисправностей* – процесс локализации и идентификации неисправностей в целом. Согласно исследованиям, приведенным в [3] неисправности в электрических машинах таких фирм как ABB Motors and Mechanical Inc., Avonmore Electrical Co. Ltd., Menzel Elektromotoren, Lafert North America, Siemens, Toshiba, и WEG в основном сосредоточены в области подшипников (рис.1). Это подтверждается исследованиями ABB, согласно [4].



Рис. 1. Неисправности в электрических машинах:

* – искажение питающего напряжения, неисправности силового преобразователя и т.п.; ** – неисправности неясного происхождения

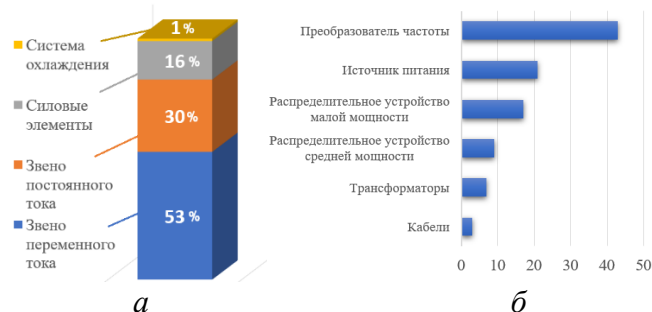


Рис. 2. Неисправности в силовой подсистеме:

а – общий вид; б – детализация

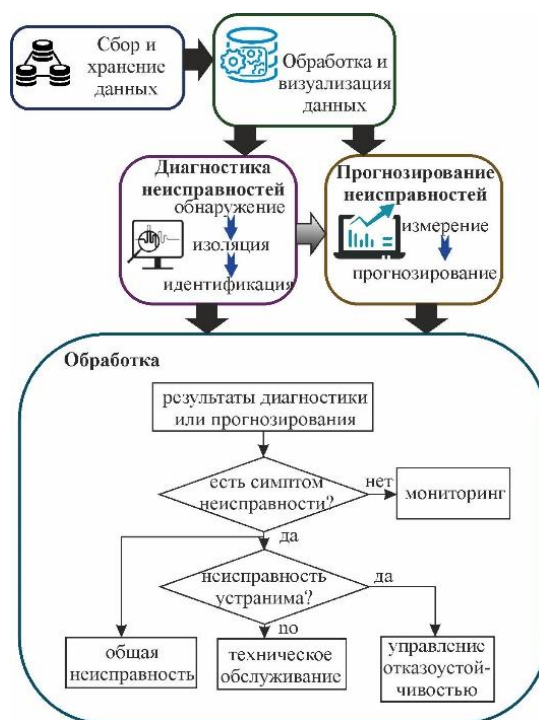


Рис. 3. Структурная схема идентификации неисправностей



Рис. 4. Методы диагностики неисправностей

Результаты исследований в части процентного соотношения локализации неисправностей в силовых полупроводниковых приборах согласно [5, 6] можно представить рис. 2.

На основании [7] можно представить систему диагностики неисправностей как часть системы управления и прогнозирования (рис. 3). Все методы обнаружения неисправностей в производственных системах нуждаются в процедуре предварительной обработки данных, которую можно разделить на две части.

Первые методы основаны на обработке сигналов. В рамках аналитического метода синтезируют математическую модель характеристик сигнала, таких как частоты, фазы, амплитуды. Сравнение полученных сигналов с типичными дает представление о возникших неисправностях. Исследователи в [8] с помощью дискретного вейвлет анализа и пакетного вейвлет-преобразования представили аналитический метод обнаружения неисправностей в производственной системе. В [9] методы обнаружения неисправностей были обобщены и применены к периодическим, нестационарным и стохастическим сигналам неисправностей. Исследователи в [10] использовали активный аналоговый полосовой фильтр для обнаружения неисправностей в электрических цепях. Работы [11-12] посвящены быстрому преобразованию Фурье для обнаружения неисправностей в асинхронном двигателе путем выбора максимальных значений пяти гармоник частот и

последующего обнаружения неисправностей в двигателе [11], а также для визуализации ошибок в трехмерном пространстве для последующей реализации требуемых аварийных сценариев [12].

Вторая разновидность методов обнаружения неисправностей основана на обработке сигналов, - канонический корреляционный анализ представлен в [13]. Но такой способ обычно реализуется в линиях электропередач, что показано в [14]. Основная идея заключается в вычислении коэффициента между опорным и реальным сигналами тока в трехфазной системе. Еще одним популярным методом обнаружения неисправностей по сигналам является авторегрессионное скользящее среднее (auto-regressive moving average - ARMA) [15-18]. В [15] дано математическое описание такого метода. В работах [16, 17] описана настройка метода ARMA для предсказания сбоев и показана возможность его использования в реализации ранней идентификации сбоев на базе Python. Авторы из [18] разработали метод ARMA, используя точный онлайн-алгоритм регрессии опорных векторов для прогнозирования сбоев в системе. Блок-схема алгоритма диагностики неисправностей ARMA представлена в [19] и реализована на аппаратно-программной платформе Rocked Engines. Второй метод — оперативная оценка сигналов, обычно основанная с применением наблюдателей для обнаружения неисправностей в системе [20, 21]. Основная идея этого метода, основанного на моделях, состоит в том, чтобы создать надежный механизм оценки для сравнения с реальными сигналами. Модели прогнозирования ARMA представлены в [22] и используются для прогнозирования неисправностей в электрических схемах аккумуляторных батарей. Большое количество исследований посвящено наблюдателям, в частности, интервальному наблюдателю повреждения обмотки статора асинхронного двигателя [23], наблюдателю дифференциального тока для устройств силовой электроники [24], наблюдателю в скользящем режиме с математическим описанием в [25] и оценки состояния, представленных в [26]. В [19] описаны методы диагностики неисправностей, основанные на сигналах и моделях с использованием подхода

нечеткой логики, нейронных сетей, а также традиционных методов мониторинга, наблюдения и обнаружения неисправностей исполнительных механизмов, приводов, датчиков и отказоустойчивых технических систем. Основные методы диагностики неисправностей представлены на рис.4. На рис. 5–7 суммированы преимущества и недостатки всех вышеприведенных методов диагностики. Принимая во внимание обзор методов обнаружения и диагностики неисправностей, а также тот факт, что неисправности в технических устройствах преобразования энергии часто возникают в спрогнозированных заранее местах, можно сделать вывод, что метод нечеткой логики является одним из возможных методов для идентификации неисправностей.



Рис. 5. Классификация методов на основе базы знаний



Рис. 6. Классификация методов на основе модельно-ориентированного подхода



Рис. 7. Классификация методов на основе метода данных

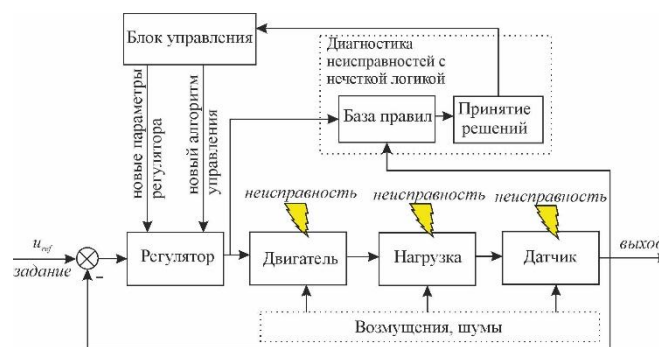


Рис. 8. Блок-схема системы диагностики неисправностей на базе нечеткой логики

Таблица 1

Методы диагностики неисправностей на базе нечеткой логики

Методы диагностики на базе нечеткой логики		
Метод	Нечеткая логика	Дерево решений с применением нечеткой логики
Описание	Синтез правил нечеткой логики и нечеткого множества IF S1^S2 THEN F1 Causalities S → Inference Strategy → F	Булева логика и нечеткие решения AND OR
Графическое объяснение		

Этот метод не требует точной математической модели устройства или самого отказа, не нуждается в больших данных и облачных сервисах и легко реализуем. Недостатки этого метода, связанные с необходимостью экспертных

знаний и возможными неопределенностями, могут быть легко устранены с помощью генетических алгоритмов. Кроме того, этот метод можно использовать онлайн с применением параллельных вычислений.

II. ПОСТАНОВКА ПРОБЛЕМЫ

Основной целью диагностики неисправностей является обнаружение неисправностей, идентификации причин их возникновения и их дальнейший анализ [27]. Принимая во внимание поставленную цель, структурная схема диагностики неисправностей на базе нечеткой логики может быть представлена на рис.8. Она состоит из нескольких логических процессов, которые могут диагностировать и обнаруживать неисправности, и в дальнейшем реализовывать систему управления с учетом возникших неисправностей.

Диагностика неисправностей с помощью нечеткой логики направлена на определение типа неисправностей с использованием как можно большего количества входных переменных. Процедуру можно представить Таблицей I. Всего выделяют два типа методов диагностики неисправностей на базе нечеткой логики: классический подход нечеткой логики и нечеткое дерево обнаружения неисправностей. Входные переменные для системы, основанной на знаниях, могут быть представлены в виде векторов S с векторами нормального поведения S_n . После взаимосвязи между входными векторами (S) и неисправностями (F) в качестве выходных переменных формируется база знаний в форме **ЕСЛИ...ТО (IF...THEN...)**. Сравнение между нормальным поведением S_n и реальными или наблюдаемыми переменными S формирует вывод о наличии ошибок F .

Метод анализа посредством дерева идентификации неисправностей оперирует входными и промежуточными переменными (симптомами в системе), выходным значением такой системы является определение вида неисправности. В такой диагностике существует не только причина и следствие, но и промежуточные события E_k , которые оперируют связями **И** и **ИЛИ** между симптомами S_i и неисправностями F_j в базе правил.



Рис. 9. Возможная аппаратная реализация диагностической системы обнаружения неисправности на базе нечеткой логики

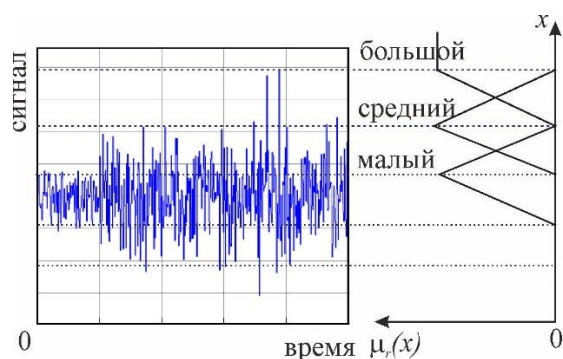


Рис. 10. Пример фаззификации входной переменной функциями принадлежности

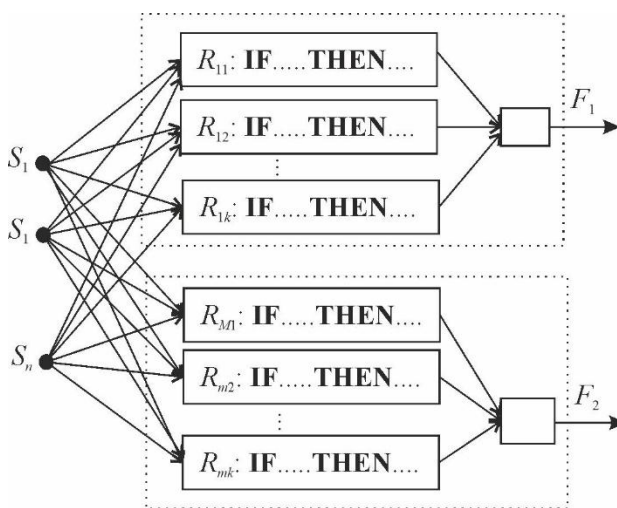


Рис. 11. Пример базы правил

При практической реализации основное внимание уделяется обработке сигнала в реальном времени и параллельной обработке, поскольку нечеткая логика имеет только базу правил без обработки больших данных о работе оборудования. На рис.9 представлена принципиальная схема возможной

практической реализации системы диагностики на базе нечеткой логики и обнаружения неисправностей, показанная в [28].

III. ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ НА БАЗЕ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Концепция обнаружения и диагностики неисправностей с помощью нечеткой логики аналогична классическому системному подходу с нечеткой логикой. Он состоит из блоков фаззификации, базы правил и дефаззификации. Как и в традиционном подходе нечеткой логики, его можно синтезировать как систему Мамдани или Такаги-Сугено.

А. Нечеткий логический подход Мамдани

Основы метода Мамдани приведены в [27, 29-32]. Первый шаг — фаззификация. Упрощенное представление этой процедуры для функций принадлежности (ФП), как показано на рис.10. Идея состоит в том, чтобы представить сигнал входной переменной функциям принадлежности, описывающие риск возникновения ошибки как Малое, Среднее и Большое. На рис.11 показана процедура нечеткой логики, основанная на алгоритме «**ЕСЛИ** признак... **ТО** неисправность...». Процедура дефаззификации может представлять собой решение «да-нет» и сигнализировать о появлении отказов и решение о действии (например, остановить устройство), как показано в [29]. В [30,31] четкий вывод находится цетроидным методом и идентифицирует есть ли неисправность в электрическом двигателе или в электрических цепях. В работе [32, 33] приведено математическое описание и архитектура диагностики неисправности на базе нечеткой логики при неисправности датчика. В [34] авторы предлагают схему алгоритма нечеткого управления с диагностикой и обнаружением неисправностей, приводят нечеткие правила.

В. Нечеткий логический подход Такаги-Сугено

Нечеткий логический подход Такаги-Сугено представлен в [35 – 42]. Основное отличие алгоритма Такаги-Сугено от Мамдани состоит в том, что система Такаги-Сугено имеет дефаззификацию с уравнениями в виде общей формы, показанной в (1) [35].

$$\begin{aligned} \mathfrak{R}^i : & \text{IF } \theta_1(k) \text{ is } S_1^i \text{ and } \theta_2(k) \text{ is } S_2^i \text{ and..} \\ & \dots \text{ and } \theta_p(k) \text{ is } S_p^i \\ \text{then } & \begin{cases} x(k+1) = \mathbf{A}_i x(k) + \mathbf{B}_i u(k) + \mathbf{F}_i f(k) + \mathbf{D}_i d(k) \\ y(k) = \mathbf{C}x(k) + \mathbf{G}f(k), i \in \{1, 2, \dots, v\} \end{cases} \end{aligned} \quad (1)$$

где $x(k) \in \mathfrak{R}^{k_x}$ - состояние системы; $u(k) \in \mathfrak{R}^{k_u}$ - входные значения; $y(k) \in \mathfrak{R}^{k_y}$ - измеренные выходные значения; $d(k) \in \mathfrak{R}^{k_d}$ - возмущения; $f(k) \in \mathfrak{R}^{k_f}$ - сигналы ошибок; v - количество нечетких правил; $\theta(k) = [\theta_1(k) \dots \theta_p(k)]$ - переменные состояния; $S_l^i (l=1, \dots, p)$ - нечеткие множества; $\mathbf{A}_i, \mathbf{B}_i, \mathbf{F}_i, \mathbf{D}_i, \mathbf{C}, \mathbf{G}$ - матрицы, описывающие систему.

Алгоритм обнаружения и диагностики неисправностей с использованием подхода Такаги-Сугено, включая изоляцию неисправностей, представлен в [36]. Авторы экспериментально подтверждают, что система с нечеткой логикой должна использовать обработку данных в реальном времени. В [37] представлены два подхода к отказоустойчивому управлению на базе моделей применительно к ветрогенератору. Первый подход является пассивным и использует только нечеткий механизм адаптации. Вторая схема является активной и использует автоматизированный алгоритм нечеткой логики для коррекции сигнала, который управляет крутящим моментом. Диагностика и управление с помощью системы нечеткой логики с алгоритмом Такаги-Сугено применительно к электромобилям рассмотрены в [38, 39]. Предложенный метод и разработанная оценка неисправности были доказаны с помощью теории Ляпунова. В работах [40-42] рассматриваются обнаружение неисправностей, диагностика и изоляция неисправностей для нелинейных систем. Эта система представлена множественными моделями Такаги-Сугено с неопределенным ФП для детектирования неисправных состояний. В [40] предложен метод переключения для устранения неопределенностей в ФП и локальных нелинейных частях. Также были разработаны наблюдатели на схеме Такаги-Сугено для описания системы в неисправном режиме. В [41] авторы для диагностики неисправностей использовали дополнительную эталонную функцию в алгоритме Такаги-Сугено, что позволило повысить надежность

оборудования. Другой метод создания систем поиска неисправностей заключается в синтезе наблюдателей с использованием нечеткой логики на основе модели Такаги-Сугено [43-44]. Такая система потребовала настройки нечеткого вывода с использованием генетического алгоритма.

С. Нейро-нечеткий логический подход

Методы, основанные на объединении нечеткой логики и нейронных сетей (ANFIS) позволяют обнаруживать и диагностировать неисправности, особенно в двигателях, посредством синтеза наблюдателей. Блок-схема метода нейро-нечеткой сети показана на рис.12. Диагностика неисправности в [45] осуществляется путем проведения тестирования элементов выходного вектора нейро-нечеткой сети. В статье [46] авторы продемонстрировали сравнение нечеткой адаптивной обучающей сети управления/решения (FALCON) и адаптивной нейро-нечеткой системы вывода (ANFIS). В статье показано, что FALCON работает медленнее, чем ANFIS, но данных от ANFIS недостаточно для идентификации неисправности, в отличие от полученных по лингвистическим правилам в FALCON. В [47] был предложен подход на основе нейро-нечетких сетей для диагностики неисправностей бесконтактного двигателя постоянного тока. Моделирование показало, что неисправность можно отследить, а система управления устойчива к возникающим неисправностям. Схема ANFIS для диагностики и обнаружения неисправностей синхронного генератора показана в [47]. Алгоритм использует токи в обмотках генератора и их амплитуды, а также амплитуду тока на основной частоте в качестве входной переменной в системе диагностики неисправностей. Из-за невозможности создания нейро-нечеткой системы управления 6-фазным синхронным двигателем с постоянными магнитами исследователи в [49] предлагают использовать рекуррентную нечеткую нейронную модель в качестве наблюдателя для минимизации последствий отказов в двигателе.

Д. Дополнительные подходы на основе нечеткой логики

Существует множество реализаций алгоритмов нечеткой логики. Наиболее популярен нечеткий тип 2 - разновидность системы Такаги-Сугено.

Сравнение подходов нечеткой логики типа 1 и нечеткой логики типа 2 с использованием метода опорных векторов для обнаружения неисправностей в подшипниках показано в [50]. Главной особенностью данного исследования является то, что авторы создали нечеткие наборы ФП zSlices [51] и валидировали этот метод обнаружения и диагностики неисправностей на реальной экспериментальной установке. В [52] приведена распределенная схема фильтрации для диагностики ошибок и создания правил в нелинейных стохастических системах.

IV. ДИАГНОСТИКА НЕИСПРАВНОСТЕЙ НА БАЗЕ ДЕРЕВА РЕШЕНИЯ С ПРИМЕНЕНИЕМ НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКИ

Как упоминалось ранее, деревья идентификации неисправностей оперируют входными переменными или признаками неисправностей, а также промежуточными значениями (дополнительными признаками) перед формированием выходного решения [53-60]. Такое дерево решений состоит из булевой логики и нечетких правил. Часто выбранных входных признаков на практике недостаточно для диагностики неисправности. На систему влияют еще дополнительные внешние воздействия, такие как внешняя среда, шумы, долговременные изменения из-за износа и другие. Концепция анализа дерева отказов может быть дополнена методологией нечеткой логики для проектирования дерева решений на базе нечеткой логики для диагностирования признаков отказов в целом. Авторы в [53-55] разработали нечеткие деревья отказов для диагностики динамических симптомов в технических системах. Структурную схему методики диагностики можно представить так, как показано на рис.13. Используя элементы «ИЛИ», «И» и решения в виде «ЕСЛИ...ТО». Исследователи в [56] реализовали тот же вид таблицы принятия решений диагностики неисправностей. Используя такой алгоритм, неисправности диагностируются максимально быстро, что позволяет аппаратной части испытательного оборудования работать без временной задержки.

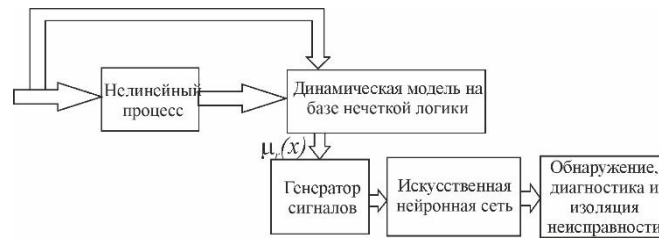


Рис. 12. Нейро-нечеткий метод в системах обнаружения неисправности



Рис. 13. Пример дерева решений с нечеткой логикой

Надежность синтезированных решений дерева нечеткой логики были рассмотрены в [57]. Количественный анализ выполнен с использованием обобщенных стохастических сетей. Применение этих алгоритмов в устройствах преобразования энергии показано в работах [58-60] для асинхронного двигателя. Неисправности подшипника были диагностированы в [59] и показано, как алгоритм с деревом нечеткой логики может прогнозировать неисправности двигателя в режиме онлайн-обучения. В статье [60] описываются решения дерева нечеткой логики для нескольких неисправностей - дефект стержней ротора, несбалансированные значения питающего напряжения в асинхронном двигателе, неисправности обмотки статора, проблемы с эксцентриситетом в двигателе. В алгоритме применяются токовые сигналы асинхронного двигателя, которые преобразуются в их частотные спектры. Для оценки надежности алгоритма авторы провели эксперименты с внешними воздействиями в виде шумов и без них.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной статье представлен обзор подходов нечеткой логики, которые могут быть применены для проектирования систем диагностики устройств преобразования энергии. В работе обобщены современные знания об использовании нечеткой логики в устройствах преобразования энергии для диагностики и мониторинга состояния. Также рассмотрены характерные особенности систем, которые необходимо учитывать для повышения надежности. Согласно проведенному исследованию, можно сделать следующие выводы:

- для ранней диагностики алгоритм управления должен быть способен прогнозировать неисправности наиболее подверженных аварийным ситуациям устройств в режиме онлайн;

- данные, используемые для диагностики, должны быть доступны для последующего повторного использования виртуальным эмулятором устройства;

- технологии цифровых двойников являются основными применениями алгоритмов идентификации неисправностей;

- объединение данных от реальных устройств преобразования энергии и цифрового двойника с методиками машинного обучения позволит диагностировать и прогнозировать состояние всей системы;

- работа цифрового двойника с применениями методов идентификации неисправностей на базе нечеткой логики, как яркого представителя экспертной системы, позволяют прогнозировать оставшийся срок службы электроэнергетической системы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Paul M. Frank, Birgit Köppen-Seliger, "Fuzzy logic and neural network applications to fault diagnosis," *International Journal of Approximate Reasoning*, vol. 16, is. 1, 1997, pp. 67-88.
2. Silvio Simani, Cesare Fantuzzi, Ron J. Patton, "Model-based Fault Diagnosis in Dynamic Systems Using Identification Techniques, *Advances in Industrial Control*," Springer-Verlag London, 2003, p.282.

3. "The Effect of Repair/Rewinding on Motor Efficiency", 2020, pp.1-82 online available: <https://www.theaemt.com/technical-info>
4. Anurag Choudhary, Deepam Goyal, Sudha Letha Shimi & Aparna Akula. Condition Monitoring and Fault Diagnosis of Induction Motors: A Review// Archives of Computational Methods in Engineering volume 26, pages1221–1238 (2019)
5. H. Wang, F. Blaabjerg, K. Ma and R. Wu, "Design for reliability in power electronics in renewable energy systems – status and future," 4th International Conference on Power Engineering, Energy and Electrical Drives, Istanbul, 2013, pp. 1846-1851
6. Toledo C, Serrano-Lujan L, Abad J, Lampitelli A, Urbina A., "Measurement of Thermal and Electrical Parameters in Photovoltaic Systems for Predictive and Cross-Correlated Monitorization," Energies 12(4)-668, 2019, pp.1-20.
7. Yaguo Lei, "Intelligent Fault Diagnosis and Remaining Useful Life Prediction of Rotating Machinery," Oxford, U.K.: Butterworth-Heinemann, 2017, p.376.
8. Zoltán Germán-Salló, Gabriela Strnad, "Signal processing methods in fault detection in manufacturing systems," Procedia Manufacturing, vol. 22, 2018, pp. 613-620.
9. M. Świercz, "Signal processing methods for fault diagnostics in engineering systems," 2015 Signal Processing Symposium (SPSymo), Debe, 2015, pp. 1-6.
10. M.Singhand R. Khade,"Faults Detection in Active Analog Bandpass Filter Using OBIST Method," Proceedings 2019: Conference on Technologies for Future Cities (CTFC),2019, pp.1-6
11. YJ. Yoo, "Fault Detection of Induction Motor Using Fast Fourier Transform with Feature Selection via Principal Component Analysis," Int. J. Precis. Eng. Manuf. 20,2019, pp. 1543–1552
12. Fu, Y., Gao, Z., Liu, Y., Zhang, A., Yin, X. , "Actuator and Sensor Fault Classification for Wind Turbine Systems Based on Fast Fourier Transform and Uncorrelated Multi-Linear Principal Component Analysis Techniques," Processes 2020, 8, 1066, pp.1-32.
13. Zhiwen Chen, Steven X. Ding, Kai Zhang, Zhebin Li, Zhikun Hu, "Canonical correlation analysis-based fault detection methods with application to alumina evaporation process," Control Engineering Practice, vol.46, 2016, pp.51-58
14. Mohammed H. H. Musa,,Zhengyou He, Ling Fu, Yujia Deng," A correlation coefficient- based algorithm for fault detection and classification in a power transmission line," IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering 13(10), 2018, pp.1-10
15. Wang J, Wang J, Du W, Zhang J, Wang Z, Wang G, Li T, "Application of a New Enhanced Deconvolution Method in Gearbox Fault Diagnosis," Applied Sciences.9(24):5313, 2019, pp.1-19
16. A. Dávalos, M. Jabloun, P. Ravier and O. Buttelli, "On the Deterministic Estimation of Multiscale Permutation Entropy of High-Order Autoregressive-Moving-Average Processes as a Function of ARMA Parameters," 2020 28th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Amsterdam, 2021, pp. 2225-2229.
17. W. Mu, A. Zhang, W. Gao and X. Huo, "Application of ARIMA Model in Fault Diagnosis of TEP," 2020 IEEE 9th Data Driven Control and Learning Systems Conference (DDCLS), Liuzhou, 2020, pp. 393-398.
18. Da-Tong Liu, Yu Peng, Xi-Yuan Peng. "Online Fault Prediction Based on Combined AOSVR and ARMA Models," Journal of Electronic Science and Technology, 7(4), 2009, pp.303-307.
19. W. Zhao, Y. Guo, J. Yang and H. Sun, "Hardware-in-the-loop Simulation Platform for Fault Diagnosis of Rocket Engines," 2019 IEEE 10th International Conference on Mechanical and Aerospace Engineering (ICMAE), Brussels, Belgium, 2019, pp. 268-273.
20. Rolf Isermann, "Fault-Diagnosis Applications. Model-Based Condition Monitoring: Actuators, Drives, Machinery, Plants, Sensors, and Fault-tolerant Systems," Springer, Berlin, Heidelberg, 2011, p.354
21. R. Isermann, "Model base fault detection and diagnosis methods," Proceedings of 1995 American Control Conference - ACC'95, Seattle, WA, USA, vol.3, 1995, pp. 1605-1609.
22. J. D. Kozłowski, C. S. Byington, A. K. Garga, M. J. Watson and T. A. Hay, "Model-based predictive diagnostics for electrochemical energy sources," 2001 IEEE Aerospace Conference Proceedings (Cat. No.01TH8542), Big Sky, MT, USA, 2001, pp. 3149-3164.

23. M. Hou and H. Shi, "Stator-Winding Incipient Shorted-Turn Fault Detection for Motor System in Motorized Spindle Using Modified Interval Observers," in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 70, 2021, pp. 1-16
24. X. Zhou, J. Sun, P. Cui, Y. Lu, M. Lu and Y. Yu, "A Fast and Robust Open-Switch Fault Diagnosis Method for Variable-Speed PMSM System," in *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 36, no. 3, 2021, pp. 2598-2610
25. L. Gou, Y. Shen, H. Zheng and X. Zeng, "Multi-Fault Diagnosis of an Aero-Engine Control System Using Joint Sliding Mode Observers," in *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 10186-10197
26. H. Kazemi and A. Yazdizadeh, "Optimal state estimation and fault diagnosis for a class of non-linear systems," in *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, vol. 7, no. 2, 2020, pp. 517-526.
27. Paul M. Frank and Birgit Kiippen-Seliger, "Fuzzy Logic and Neural Network Applications to Fault Diagnosis," *International Journal of Approximate Reasoning*, 16:67-88, 1997, pp.1-22
28. J. L. Musgrave, Ten-Huei Guo, E. Wong and A. Duyar, "Real-time accommodation of actuator faults on a reusable rocket engine," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 5, no. 1, 1997, pp.100-109
29. H. F. Azgomi and J. Poshtan, "Induction motor stator fault detection via fuzzy logic," 2013 21st Iranian Conference on Electrical Engineering (ICEE), Mashhad, 2013, pp. 1-5.
30. F. Zidani, D. Diallo, M. E. H. Benbouzid and R. Nait-Said, "A Fuzzy-Based Approach for the Diagnosis of Fault Modes in a Voltage-Fed PWM Inverter Induction Motor Drive," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 55, no. 2, 2008, pp. 586-593.
31. Naveena G J, M. Dodakundi and A. Layadgundi, "Fault diagnosis of VSI fed induction motor drive using fuzzy logic approach," 2015 International Conference on Power and Advanced Control Engineering (ICPACE), Bangalore, 2015, pp. 315-321.
32. H. Wang, G. Yang and D. Ye, "Fault Detection and Isolation for Affine Fuzzy Systems With Sensor Faults," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 24, no. 5, 2016, pp. 1058-1071
33. A. L. Dexter and M. Benouarets, "Model-based fault diagnosis using fuzzy matching," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics - Part A: Systems and Humans*, vol. 27, no. 5, 1997, pp. 673-682.
34. S. M. El-Shal and A. S. Morris, "A fuzzy expert system for fault detection in statistical process control of industrial processes," in *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews)*, vol. 30, no. 2, 2000, pp. 281-289
35. L. Li, M. Chadli, S. X. Ding, J. Qiu and Y. Yang, "Diagnostic Observer Design for T-S Fuzzy Systems: Application to Real-Time-Weighted Fault-Detection Approach," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 26, no. 2, 2018, pp. 805-816
36. L. F. Mendonca, J. M. G. Sá da Costa and J. M. Sousa, "Fault detection and diagnosis using fuzzy models," 2003 European Control Conference (ECC), Cambridge, UK, 2003, pp. 647-652.
37. H. Badihi, Y. Zhang and H. Hong, "Wind Turbine Fault Diagnosis and Fault-Tolerant Torque Load Control Against Actuator Faults," in *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 23, no. 4, 2015, pp. 1351-1372.
38. Q. Shen, B. Jiang and V. Cocquempot, "Fault-Tolerant Control for T-S Fuzzy Systems With Application to Near-Space Hypersonic Vehicle With Actuator Faults," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 20, no. 4, 2012, pp. 652-665.
39. Q. Shen, B. Jiang and V. Cocquempot, "Fuzzy Logic System-Based Adaptive Fault-Tolerant Control for Near-Space Vehicle Attitude Dynamics With Actuator Faults," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 21, no. 2, 2013, pp. 289-300.
40. G. Yang and H. Wang, "Fault Detection and Isolation for a Class of Uncertain State-Feedback Fuzzy Control Systems," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 23, no. 1, 2015, pp. 139-151.
41. X. Li and G. Yang, "Fault Detection in Finite Frequency Domain for Takagi-Sugeno Fuzzy Systems With Sensor Faults," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 44, no. 8, 2014, pp. 1446-1458/

42. J. Han, H. Zhang, Y. Wang and X. Sun, "Robust Fault Detection for Switched Fuzzy Systems With Unknown Input," in *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol. 48, no. 11, 2018, pp. 3056-3066.
43. L. Wu and D. W. C. Ho, "Fuzzy Filter Design for Itô Stochastic Systems With Application to Sensor Fault Detection," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 17, no. 1, 2009, pp. 233-242.
44. B. -S. Chen, M. -Y. Lee, W. -Y. Chen and W. Zhang, "Reverse-Order Multi-Objective Evolution Algorithm for Multi-Objective Observer-Based Fault-Tolerant Control of T-S Fuzzy Systems," in *IEEE Access*, vol. 9, 2021, pp. 1556-1574.
45. Jong-Ryul Lee, Sang-Wook Bae, Kee-Sang Lee and Gwi-Tae Park, "Fault diagnosis of non-linear system based on fuzzy dynamic model," *FUZZ-IEEE'99. 1999 IEEE International Fuzzy Systems. Conference Proceedings (Cat. No.99CH36315)*, Seoul, South Korea, 1999, pp. 245-250.
46. S. Altug, Mo-Yuen Chen and H. J. Trussell, "Fuzzy inference systems implemented on neural architectures for motor fault detection and diagnosis," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 46, no. 6, 1999, pp. 1069-1079.
47. H. Xue and J. G. Jiang, "Fault Detection and Accommodation for Nonlinear Systems Using Fuzzy Neural Networks," *2006 CES/IEEE 5th International Power Electronics and Motion Control Conference*, Shanghai, 2006, pp. 1-5.
48. H. Fang and C. Xia, "A Fuzzy Neural Network Based Fault Detection Scheme for Synchronous Generator with Internal Fault," *2009 Sixth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery*, Tianjin, 2009, pp. 433-437.
49. F. Lin, I. Sun, K. Yang and J. Chang, "Recurrent Fuzzy Neural Cerebellar Model Articulation Network Fault-Tolerant Control of Six-Phase Permanent Magnet Synchronous Motor Position Servo Drive," in *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, vol. 24, no. 1, 2016, pp. 153-167.
50. H. Hassani, J. Zarei, M. M. Arefi and R. Razavi-Far, "zSlices-Based General Type-2 Fuzzy Fusion of Support Vector Machines With Application to Bearing Fault Detection," in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 64, no. 9, 2017, pp. 7210-7217
51. C. Wagner and H. Hagnas, "zSlices — towards bridging the gap between interval and general type-2 fuzzy logic," *2008 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (IEEE World Congress on Computational Intelligence)*, 2008, pp. 489-497, doi: 10.1109/FUZZY.2008.4630413.
52. Y. Gao, F. Xiao, J. Liu and R. Wang, "Distributed Soft Fault Detection for Interval Type-2 Fuzzy-Model-Based Stochastic Systems With Wireless Sensor Networks," in *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, no. 1, 2019, pp. 334-347.
53. M. Ulieru, "Diagnosis by approximate reasoning on dynamic fuzzy fault trees," *Proceedings of 1994 IEEE 3rd International Fuzzy Systems Conference*, Orlando, FL, vol.3, 1994, pp. 2051-2056
54. Zong-Xiao Yang, K. Suzuki, Y. Shimada and H. Sayama, "Fuzzy fault diagnostic system based on fault tree analysis," *Proceedings of 1995 IEEE International Conference on Fuzzy Systems.*, Yokohama, Japan, 1995, pp. 165-170 vol.1, doi: 10.1109/FUZZY.1995.409676.
55. S. Huang, R. Duan, J. He, T. Feng and Y. Zeng, "Fault Diagnosis Strategy for Complex Systems Based on Multi-Source Heterogeneous Information Under Epistemic Uncertainty," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 50921-50933, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.2980397.
56. S. Kabir, T. K. Geok, M. Kumar, M. Yazdi and F. Hossain, "A Method for Temporal Fault Tree Analysis Using Intuitionistic Fuzzy Set and Expert Elicitation," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 980-996, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2961953.
57. S. Kabir, M. Yazdi, J. I. Aizpurua and Y. Papadopoulos, "Uncertainty-Aware Dynamic Reliability Analysis Framework for Complex Systems," in *IEEE Access*, vol. 6, pp. 29499-29515, 2018, doi: 10.1109/ACCESS.2018.2843166.
58. T. W. Yiu, S. O. Cheung and C. L. Lok, "A Fuzzy Fault Tree Framework of Construction Dispute Negotiation Failure," in *IEEE Transactions on Engineering Management*, vol. 62, no. 2, pp. 171-183, May 2015, doi: 10.1109/TEM.2015.2407369.
59. M. Seera and C. P. Lim, "Online Motor Fault Detection and Diagnosis Using a Hybrid FMM-CART Model," in *IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems*, vol. 25, no. 4, pp. 806-812, April 2014, doi: 10.1109/TNNLS.2013.2280280.

60. M. Seera, C. P. Lim, D. Ishak and H. Singh, "Fault Detection and Diagnosis of Induction Motors Using Motor Current Signature Analysis and a Hybrid FMM–CART Model," in IEEE Transactions on Neural Networks and Learning Systems, vol. 23, no. 1, pp. 97-108, Jan. 2012, doi: 10.1109/TNNLS.2011.2178443.

Лукин А. Е.^{1,2}, Егоров А. В.², Лукичев Д. В.^{1,2}, Демидова Г. Л.^{1,2}, Усольцев А. А.^{1,2}

¹Факультет систем управления и робототехники

²Научно-производственный центр прецизионной электромеханики

СИНХРОННЫЙ ДИСКОВЫЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С АКСИАЛЬНЫМ МАГНИТНЫМ ПОТОКОМ

Аннотация: Работа посвящена разработке синхронного двигателя с аксиальным магнитным потоком и постоянными магнитами (АСДПМ), обладающего малыми пульсациями электромагнитного момента и значительным удельным электромагнитным моментом и предназначенного для применения в прецизионных безредукторных приводах робототехнических комплексов. Расчет параметров двигателя производился численными методами с применением различных методик и с последующей валидацией в специализированных пакетах методом конечного моделирования. При разработке конструкции изделия использовался инструментарий CAD/CAE/CAM в том числе с целью облегчения конструкции. Экспериментальные исследования изготовленного двигателя показали успешное достижение заданных характеристик.

Ключевые слова: синхронный двигатель с постоянными магнитами; аксиальный магнитный поток; методы конечного моделирования; моделирование; разработка конструкции; изготовление

I. ВВЕДЕНИЕ

В прецизионных приводах робототехнических комплексов предъявляются высокие требования к точности слежения и позиционирования. Одной из главных проблем в таких приводах является наличие пульсаций электромагнитного момента, создаваемого взаимодействием поля постоянных магнитов с зубцами пакета магнитопровода, между которыми в пазах уложены витки обмоток (зубцовый момент). Величина этих пульсаций может достигать нескольких процентов от номинального вращающего момента и, таким образом, вносить существенную погрешность в точность управления координатами движения. Так как зубцовый момент не зависит от величины тока в обмотках двигателя, то в режимах работы с малым динамическим моментом пульсации момента могут превышать полезный момент создаваемый приводами робототехнических комплексов. Единственным техническим решением,

исключающим пульсации, является беспазовая (беззубцовая) конструкция двигателя [6].

Пульсации момента зависят также от распределения магнитного потока в зазоре. Для минимизации пульсаций поток должен быть распределен синусоидально и синусоидальной должна быть также форма фазных токов. В прецизионных приводах используют двигатели именно с такой формой распределения потока, в отличие от двигателей с трапецеидальным распределением и прямоугольной формой токов.

Еще одной особенностью следящих приводов является отказ от редуктора, который не только ухудшает статические и динамические характеристики системы, но и является источником существенных механических потерь и частой причиной аварийных ситуаций. С учетом перечисленных факторов наиболее востребованными электроприводами в робототехнических комплексах являются безредукторные приводы с синхронными моментными двигателями, с возбуждением от постоянных магнитов (ПМ).

В настоящий момент наиболее перспективными среди них – аксиальные синхронные двигатели с постоянными магнитами (АСДПМ), которые обладают лучшими массогабаритными показателями по сравнению с двигателями радиальной конструкции [1]. По мере увеличения мощности двигателя это преимущество становится еще более ярко выражено (рис.1).

Также дисковые (аксиальные) являются более технологичными, что позволяет изготавливать их с меньшими производственными затратами [2]. В настоящий момент данные двигатели находят все более широкое применение.

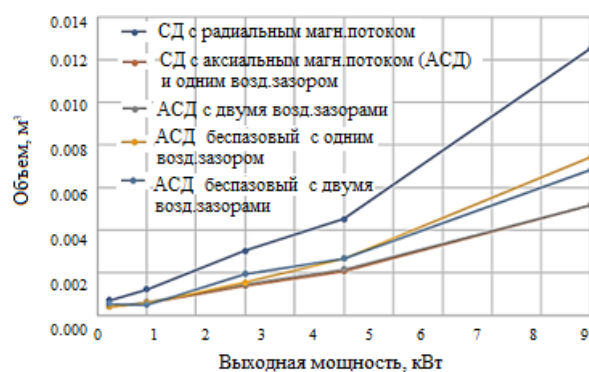


Рис. 1. Зависимость объема, занимаемого двигателем от выходной мощности

АСДПМ активно применяются в качестве привода манипуляторов, лифтов и насосов. Маломощные двигатели применяются в качестве сервопривода. С недавнего времени плоские компактные дисковые двигатели начали применяться в составе приводов электромобилей [4].

Характерной особенностью АСДПМ является также малая длина и относительно большой диаметр по сравнению с радиальными синхронными двигателями с постоянными магнитами [3]. Это позволяет увеличить полюсность двигателя, снизив тем самым скорость вращения, что, в свою очередь, позволяет упростить кинематику привода за счет исключения механического редуктора.

Из приведенного рис.1 также видно, что беспазовые дисковые синхронные двигатели при мощности до 1 кВт практически не уступают по массогабаритным показателям дисковым синхронным двигателям с пазами на статоре, при этом в них отсутствуют пульсации зубцового момента [6]. Также из рис.1 следует, что из приведенных конструкций наилучшими габаритными показателями обладают аксиальные беспазовые двухроторные двигатели с двумя воздушными зазорами.

Таким образом, ставилась задача разработки синхронного двигателя с беспазовым статором, находящимся между двумя роторами с постоянными магнитами с аксиальным направлением магнитного потока, предназначенного для применения в прецизионных безредукторных приводах робототехнических комплексов.

В качестве исходных данных были приняты следующие значения для разрабатываемого двигателя:

- вращающий момент, не менее 5 Н·м.
- частота вращения, не менее 500 об/мин.
- номинальный фазный ток, не более 20 А.
- линейное напряжение питания на обмотках двигателя (действующее значение), не более 380 В.
- внешний диаметр двигателя, не более 300 мм.

Объект разработки также должен обладать:

- отсутствием зубцовых пульсаций электромагнитного момента;
- высоким удельным электромагнитным моментом для данного типа двигателей.

Этапы разработки включают следующие пункты:

1. Расчет двигателя численными методами с использованием различных методик
2. Проверка расчета в специализированных пакетах методом конечного моделирования (Ansys, Autodesk)
3. Разработка конструкции изделия в Solid Works/Autodesk Inventor с возможным применением метода генеративного дизайна с целью облегчения конструкции [7].

II. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСНОВНЫХ ГЕОМЕТРИЧЕСКИХ РАЗМЕРОВ МАГНИТНОЙ СИСТЕМЫ

A. Выбор магнитов и конструкции ротора

Обзор рынка постоянных магнитов показал, что среди типовых форм магнитов из каталогов отечественных производителей (дистрибьютеров) наиболее удачной является форма магнита в виде лепестка (сектора). Форма магнита показана на рис. 2. За основу для расчета магнитной системы были взяты магниты с внутренним радиусом 40 мм, внешним радиусом 80 мм и угловым размером $22,5^\circ$. Толщина магнитов в каталоге составляла 8 мм.

На рис. 2 показаны возможные направления намагничивания для магнитов в форме сектора.

Машины без сердечника на статоре характеризуются более низкими удельными показателями, по сравнению с машинами с пазовым (зубцовым) статором. Индукция в немагнитном зазоре таких машин ниже, чем у машины с железом. Для повышения индукции в зазоре и одновременно улучшения распределения магнитного было принято решение об использовании магнитных сборок. Такое техническое решение порой позволяет полностью отказаться от железного магнитопровода, например ярма ротора, так как замыкание магнитного поля происходит преимущественно с одной стороны сборки [6]. В литературных источниках описываются методики расчета величины индукции, создаваемой магнитными системами Малинсона-Хальбаха простой формы, но нет методик определения гармонического спектра этих гармоник.

Наиболее простым в реализации, а порой и единственно реализуемым, является сборка с углом 90° . На рис. 3 представлена сборка Малинсона-Хальбаха с углом намагничивания 90° .

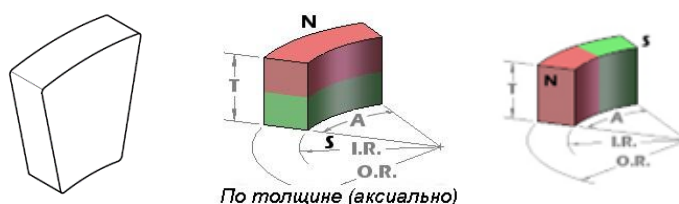


Рис. 2. Магнит в форме сектора и возможные направления намагничивания магнитов в аксиальном направлении для использования в сборке Хальбаха

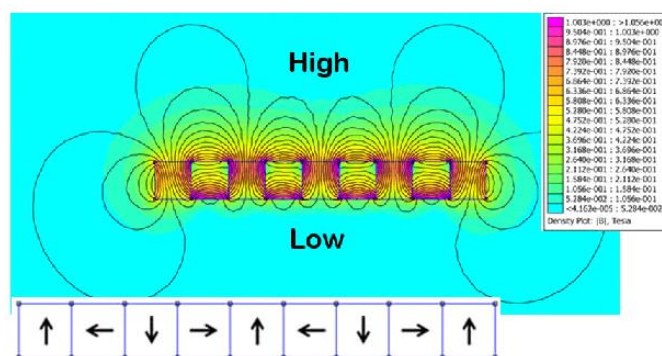


Рис. 3. Сборка магнитов в массив Хальбаха

В. Расчет параметров постоянных магнитов и параметров ферромагнитного сердечника

Исходя из геометрических размеров магнитов, каждый из двух роторов представляет сборку из 16 магнитов секторов, образуя четыре пары полюсов. Для оценки гармонического состава магнитного поля, создаваемого такой сборкой, был выбран метод конечных элементов (МКЭ). Опыт проведения такого вида расчетов показывает, что анализ гармонического состава методом конечных элементов зачастую достаточно проводить в двумерной плоскости (2D). Такой подход позволяет значительно экономить вычислительные ресурсы.

Создание модели магнитного зазора классического цилиндрического двигателя с радиальной намагниченностью ПМ – стандартная практика. В случае дискового двигателя с аксиальным магнитным потоком требуются дополнительные приемы. На рисунке 4 (сверху) представлена раскладка магнитов в поперечном разрезе двигателя (каждый из двух дисков ротора имеет одинаковую раскладку магнитов). Поле, создаваемое такой магнитной сборкой, направлено перпендикулярно плоскости рисунка. Переход к двумерной модели, в которой будет виден немагнитный зазор, осуществляется следующим образом. На рис. 4 (сверху) штриховой линией показана секущая линия, представляющая собой окружность с радиусом, вычисленным как полу сумма внутреннего и внешнего радиуса магнитов. Результат пересечения цилиндрической поверхности с магнитной системой аксиального двигателя представлен на рис. 4 (снизу) в виде развертки. Ширина одного магнита на радиусе 60 мм составила 24 мм (магниты с аксиальным и тангенциальным направлением намагничивания имеют одинаковые размеры).

На рис. 5 показаны графики распределение индукции магнитного поля вдоль средней линии зазора двумя массивами Хальбаха в зависимости от высоты магнитов (h_{mag}) и величины немагнитного зазора между ними ($Airgapp$), который представляет собой сумму толщины статора и ширины двух воздушных зазоров.

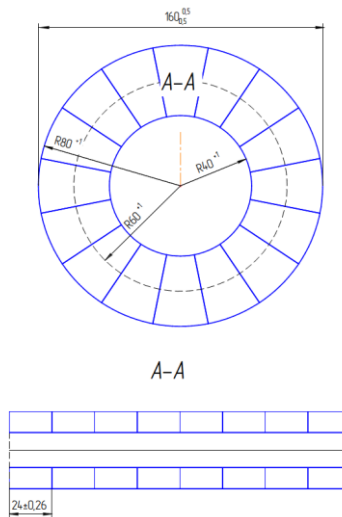


Рис. 4. К описанию методики гармонического анализа магнитных полей

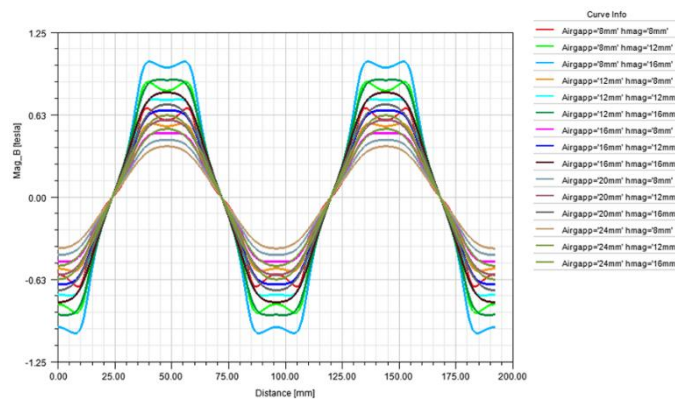


Рис. 5. Распределение индукции в немагнитном зазоре

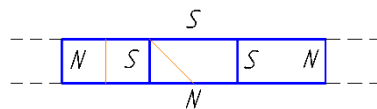


Рис. 6. К определению рабочих точек постоянных магнитов

Результаты анализа гармонического состава получившейся индукции магнитного поля в центре немагнитного зазора (вдоль сплошной линии черного цвета на рис.4) показывают, что наибольшую амплитуду из высших составляющих имеет пятая гармоника, величина которой абсолютно не зависит (по абсолютному значению) от высоты магнита и заметно уменьшается с ростом немагнитного зазора. Необходимо отметить, что во всех случаях седьмая гармоника в поле постоянных магнитов отсутствует, а третья и девятая гармоника, во-первых существенно меньше пятой, а во-вторых не создают момент высших гармоник в трехфазной машине, поэтому далее могут не учитываться.

На рис. 6 изображены линии, вдоль которых вычислялись значения индукции магнита (красные тонкие линии), соответствующие рабочим точкам на кривой размагничивания при различном значении немагнитного зазора и аксиального размера магнитов (высоты магнитов). При исследовании распределения индукции вдоль средней линии тангенциально намагниченного магнита было получено, что все значения при изменяемых параметрах находятся выше уровня 0.7Тл. Выбор линии для аксиального магнита (изображен в центре рис. 6) не однозначен, так как магнитное поле внутри аксиального магнита значительно искажено полем тангенциально намагниченных магнитов.

На рис. 7 представлены графики индукции внутри аксиально намагниченного ПМ. Рабочая точка аксиального ПМ при отсутствии ферромагнитного сердечника находится очень низко (рис.7 (а)). Если магниты ротора разместить на стальном диске, то рабочая точка магнита сместится заметно выше. Распределение индукции в аксиальном ПМ при наличии стального диска толщиной 5 мм изображено на рис.7 (б). Наличие стальных дисков также изменяет гармонический состав индукции в зазоре: было получено, что увеличивается амплитуда 1ой и 3ей гармоники, 5ая не меняется.

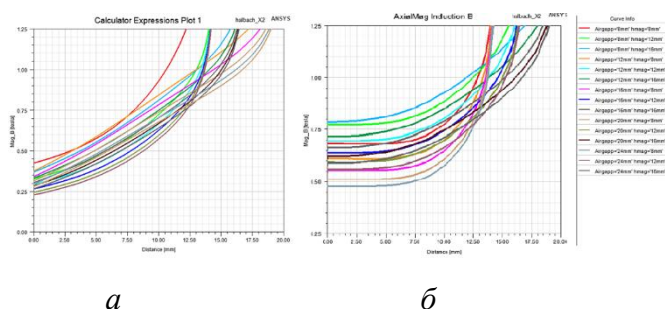


Рис. 7. Индукция внутри аксиально намагниченных ПМ:
а – при отсутствии ферромагнитного сердечника; *б* – со стальным диском

Исследовались значения и гармонический состав индукции в центре немагнитного зазора в зависимости от толщины ярма ротора. Чем толще диск ротора, тем больше его масса. Масса двух стальных дисков толщиной по 5 мм и диаметром 160 мм составляет порядка 1,5 кг. Прирост момента при этом составляет 12-13%, что при общей массе машины менее 10 кг снизит его

удельный момент. Рациональным с точки зрения повышения удельного момента будет выбор диска толщиной 1,5..3,5 мм в зависимости от полной массы двигателя. После проведенного анализа толщина стального диска ротора была выбрана равной 3,2 мм. Расчетная толщина статора и каждого воздушного зазора составили соответственно 14 мм. и 1 мм.

III. ВЫБОР МАТЕРИАЛОВ И РАСЧЕТ ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИИ ДЛЯ ИЗГОТОВЛЕНИЯ АКСИАЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Работа любой электрической машины в зависимости от конструкции, характеристик и способа ее охлаждения сопровождается выделением тепловой энергии в различных ее частях. Применение самовентиляции в проектируемой электрической машине невозможно, так как двигатель предназначен для работы в составе широко-регулируемого привода, для которого характерны в том числе и инфра-низкие частоты вращения.

Для повышения удельных характеристик машины (повышения мощности при сохранении габаритов и веса) при выбранном естественном способе охлаждения необходимо выбрать материалы машины с расширенным диапазоном рабочих температур. В первую очередь речь идет об увеличении верхней границы рабочих температур, то есть выбор более нагревостойких материалов: обмоточных проводов, пропиточных лаков и заливочных компаундов, магнитов, подшипников.

А. Выбор материала магнитов

Для применения в конструкции ротора рассматривались характеристики различных ПМ на основе редкоземельных элементов: прежде всего неодимовые магниты на основе неодим-железо-бор (NdFeB) и различные сплавы самарий-кобальт (SmCo_5 и $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$).

С ростом температуры магнита уменьшается его коэрцитивная сила и остаточная намагниченность. Степень такого снижения определяется соответствующими коэффициентами. Исходя из тепловых режимов, полученных на основе заданных нагрузочных диаграмм, определена предельная

рабочая температура двигателя на уровне 150°C , что соответствует температурному классу магнитов не ниже SH. Самарий-кобальтовые магниты менее чувствительны к повышению температуры, но при обычных температурах у них ниже максимально достижимая остаточная намагниченность. На рис. 8 в качестве примера приводится сравнение плотности энергий самарий-кобальтовых (R33E, R35E) и неодимовых (N38AH, N42EH) ПМ при изменении температуры.

Предпочтительными для проектируемого двигателя являются неодимовые магниты N35SH с индукцией 1,23 Тл (и магниты имеющие большие порядковые номера Nxx, соответствующие большим значениям магнитной энергии) и магниты на основе сплава $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ YXG-26 с индукцией 1,05 Тл (и марки с большим значением остаточной индукции). Выбор конкретной марки магнита для проектирования определяется не только техническими, но и экономическими показателями. С точки зрения цены неодимовые магниты стоят дороже чем самарий-кобальтовые за единицу массы, но при пересчете на единицу магнитной энергии они выгоднее, чем самарий кобальтовые (при температуре 20°C). Если рабочая температура магнита составляет $100\text{-}200^{\circ}\text{C}$, то выбор в пользу неодимового магнита не так однозначен. Так магнит марки N42EH нагревостойкостью 200°C имеет большую удельную энергию, чем магнит R33E только до 170°C , а магнит N38AH предпочтительней чем R33E при температурах до $110\text{-}120^{\circ}\text{C}$ (см. рис. 8).

Немаловажным показателем при выборе магнита является доступностью марок на рынке. Именно данный показатель в конечном счете явился определяющим при выборе магнитов на основе сплава $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ марки YXG28 со значением остаточной индукцией 1,08 Тл. Габариты магнитов, доступных на рынке, составили R84xr40x22'30 с толщиной 10 мм, что незначительно отличается от магнитов, использованных в ходе моделирования.

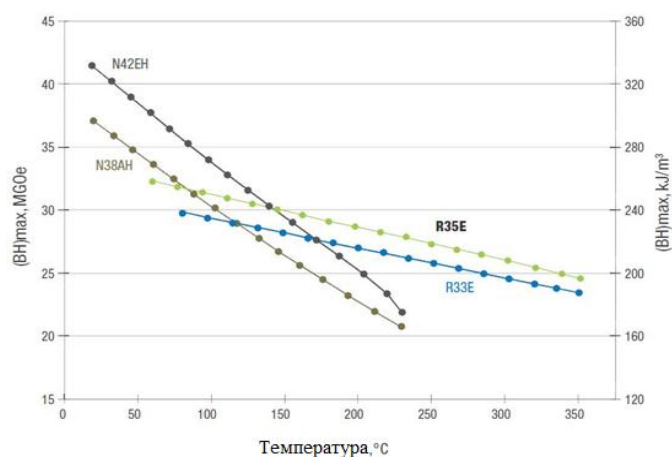


Рис. 8. Сравнение плотности энергий самарий-кобальтовых и неодимовых ПМ при изменении температуры

В. Расчет обмотки и параметров двигателя

Исходя из тепловых воздействий и токовых нагрузок двигателя был выбран обмоточный провод ПЭВ-155 0,85. Расчет геометрических (рис. 9) и электрических параметров катушки производился исходя из следующих исходных данных:

- внешний диаметр для катушки $D_{out}=0,16$ м;
- число полюсов $p=8$;
- плотность тока $j=6,3$ А/мм²;
- обмоточный коэффициент $k_w=0,945$.

После расчета параметров обмотки были рассчитаны вычислены параметры двигателя. В табл. 1 приводится их сравнение с существующими на рынке аналогами.

Таблица 1

Сравнение аналогов

Параметр	eTorq, Bodine electric company (США)	RSMR-T-36-115-25-C- HS-KF-AM, Ruchservomotor	Университет ИТМО
1	2	3	4
Номинальная скорость вращения, об/мин	1500	1100	500
Вращающий момент, Н*м	2,83	1,7	5,5
Ток в фазе, А(rms)	2	2,6	2,1
Постоянная момента Н*м/А	1,30	0,65	2,61

Окончание табл. 1

1	2	3	4
Пиковый вращающий момент, Н*м	13,7	5,7	30
Пиковый ток, А	10,5	8,7	11,5
Зубцовый момент	-	-	-
Электромагнитная пост.времени, мс	0,734	0,7	1,2
Рассеиваемая мощность, Вт	171,6	76	53,4
Напряжение питания, VDC	300	220/380 Ac	96
Диаметр x Аксиальный размер, мм	178x72,4	178x22	220x74
Масса, кг	6,17	3	8,3
Тип двигателя	AF slotless	AF slotless, one airgap	AF slotless, dualgap
Коэффициент статической добротности, Нм/(кг·√Вт)	0,130	0,333	0,494

С. Выбор подшипников и проектирование подшипниковых узлов

Особенности проектируемого электродвигателя предъявляют дополнительные требования к применяемым подшипникам. Данные требования вызваны конструктивными и эксплуатационными свойствами АСДПМ:

1. Возможность воспринимать комбинированные нагрузки. Проектируемый АСДПМ предназначен для работы в составе мехатронных и робототехнических систем: манипуляторов, поворотных столов, мотор-колес и т. д. При такой широкой номенклатуре возможных применений двигатель должен быть спроектирован с учетом как осевых, так и радиальных нагрузок. АСДПМ проектируется с фланцевыми креплениями, следовательно, при решении практических задач двигатель может быть ориентирован как горизонтально, так и вертикально. Из этого следует необходимость подшипников воспринимать осевую нагрузку в двух направлениях.

2. Плавность хода. В прецизионных приводах робототехнических комплексов предъявляются высокие требования к точности слежения и позиционирования. Данное требование обуславливает использование беспазовой конструкции, что позволяет устранить пульсации момента при работе двигателя. Подшипники, в свою очередь, должны быть подобраны так,

чтобы обеспечить максимально возможную плавность хода. В случае выбора неоптимальных подшипников пульсации, вызванные неровностью хода могут лишить двигатель одного из ключевых преимуществ.

3. Температурный режим. Режим работы электродвигателя должен совпадать с температурным режимом подшипников с целью исключения заклинивания подшипника при нагреве, потенциально вызываемом работой электродвигателя.

4. Стойкость к электрической эрозии. При применении подшипников в составе электродвигателей существует риск прохождения электрических токов через проводящие компоненты, приводя к эрозии контактных поверхностей тел и дорожек качения, а также ухудшению качества смазки. Возможное наличие таких токов должно быть учтено при выборе подшипника и проектировании подшипниковых узлов.

Подбор подшипника осуществлялся по методике, предоставленной компанией SKF [8]. Выбор методологии SKF обусловлен большим количеством факторов, которые учитываются в процессе подбора подшипников, поэтапной алгоритмической структуре, позволяющей применять метод итерации, а также возможности использовать данную методику непосредственной для выбора готовых подшипников из каталога производителя.

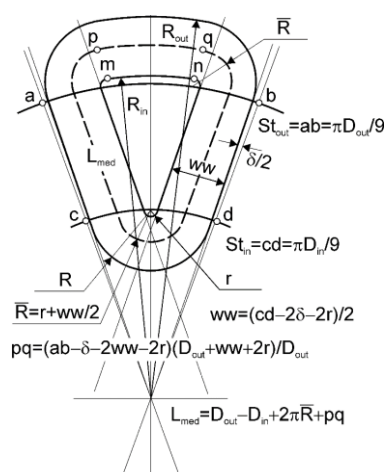


Рис. 9. К расчету параметров обмотки беспазового статора

Процесс выбора подшипников разделен на четко определенные этапы, каждый из которых позволяет учитывать различные технические

характеристики подшипников в зависимости от конкретных областей и особенностей применения:

- рабочие характеристики и условия эксплуатации;
- тип и конструкция подшипника;
- размер подшипника;
- смазывание;
- рабочая температура и частота вращения;
- сопряженные детали подшипника;
- исполнение подшипника;
- уплотнения, монтаж и демонтаж.

При известных характеристиках электродвигателя, данная методика позволяет подобрать подходящий подшипник непосредственно из каталога производителя. Также данная методика может быть автоматизирована с помощью математического программного обеспечения с целью упрощения процесса расчета и возможного введения поправок при итерационном подходе к решению задачи. В ходе данной работы обработка данных проводилась в среде MathCAD. Исходя из заданного максимального момента на валу 45 Нм и диаметра делительной окружности был проведен расчет радиальной нагрузки на вал, которая составила 450 Н.

С учетом осевой нагрузки, предпочтительным вариантом являются однорядные или двухрядные радиально-упорные шарикоподшипники, однако данные узлы отличаются большими габаритами по сравнению со радиальными подшипниками качения и в случае с дисковым двигателем применение таких подшипников может увеличить осевые габариты машины. Также была исследована возможность применения подшипников с керамическими телами качения, отличающимися высокой износостойкостью и токоизоляцией. Окончательно для применения в двигателе был выбран радиальный шарикоподшипник.

Для определения размера подшипника (или его выбора из доступной номенклатуры) используются два основных критерия:

•Выбор в зависимости от номинального ресурса. Проводится расчет ресурса подшипника с учетом контактной усталости при качении. Выходными данными является номинальный ресурс или номинальный ресурс SKF (L10 и L10m)

•Выбор в зависимости от статической нагрузки. Проводится на основе статической нагрузки с учетом влияния остаточной деформации. Выходными данными является статический коэффициент запаса s_0

Расчет в среде MathCAD для выбранного в соответствии с внутренним диаметром (соответствует диаметру вала) подшипника 7002 C TR SUL P3 NSK показал удовлетворение обоим вышеперечисленным критериям.

Далее определены рекомендуемые допуски для посадочных поверхностей вала и корпуса, с учетом температурного режима выбрана смазка, обеспечивающая оптимальную работу подшипников.

D. Разработка дисков ротора электромагнитного двигателя с постоянными магнитами и аксиальным магнитным потоком

Выбранные магниты необходимо расположить по всему диаметру диска ротора. Общее число магнитов в таком случае составит 16 на каждый из дисков. Предварительные расчеты показали, что сила, с которой притягиваются магниты, устанавливаемые на диски, составляет 1200 Н. Исходя именно из этой нагрузки, были рассчитаны на прочность модели дисков. Расчеты позволяющие узнать, какие части детали наименее нагружены, проводились в программе Autodesk Inventor.

Моделирование осуществлялось для стали марки AISI 1057, параметры которой приведены в Таблице 2.

Для оптимизации была выбрана конструкция диска ротора в виде «чашки» с гладкой внутренней частью и с бортиками на внешней части для точного позиционирования магнитов. При этом к конструкции предъявили следующие требования:

- коэффициент запаса диска в самой слабой точке в диапазоне - выше 3;
- масса не больше 500 гр.;

□ максимальное смещение точки не более 0.2 мм.

Были рассмотрены несколько вариантов конструкций диска ротора, которые характеризовались различными прочностными и весовыми параметрами (табл. 3).

Таблица 2

Сталь AISI 1057 (аналог стали 45)

Плотность	7.85E-06 кг / мм ³
Модуль Юнга	210000 МПа
Коэффициент Пуассона	0.28
Предел текучести	365.4 МПа
Предел прочности	636.4 МПа
Теплопроводность	0.0466 Вт / (мм С)
Коэффициент теплового расширения	1.111E-05 / С
Удельная теплоемкость	480 Дж / (кг С)

Таблица 3

Параметры различных конструкций дисков ротора

	Диск 1	Диск 2	Диск 3
Масса, г	552	544	387
Коэффициент запаса	3.986	4.405	3.519
Максимальное смещение, мм	0.07988	0,06654	0.1531

Учитывая, что важнейшим фактором оптимизации является масса диска, было принято решение использовать для дальнейшей работы конструкцию диска № 3 (рис. 10).

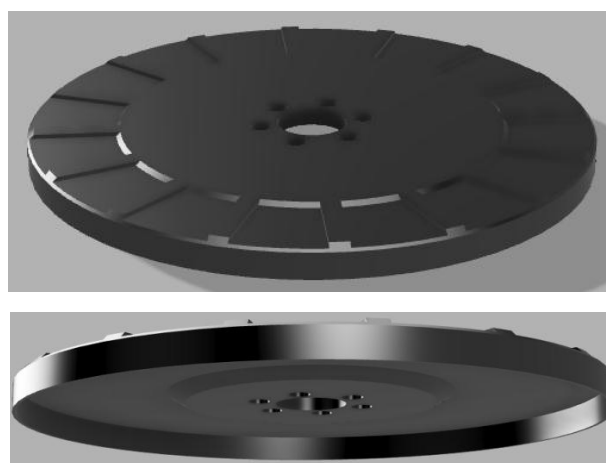


Рис. 10. Оптимизированный диск, вариант 3: вид сверху и снизу

IV. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Разработанный и изготовленный двигатель (рис. 11 (а)) проверялся на специализированном электромеханическом стенде СЭМ-2 фирмы Мехатроника-Про (рис. 11 (б)).

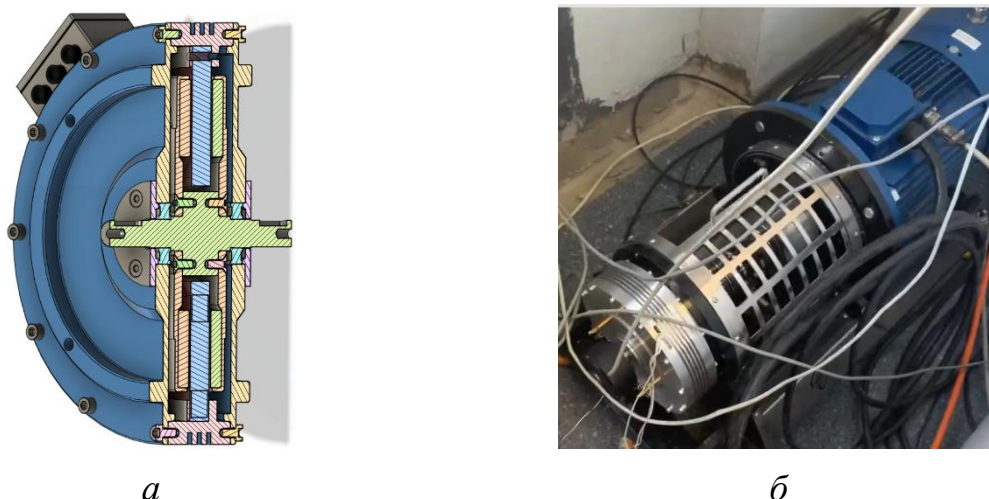


Рис. 11. Конструкция проектируемого двигателя (а) и его опытный образец на испытательном стенде (б)

Было показано, что двигатель удовлетворяет заданным характеристикам. На рис. 12 приводится механическая характеристика АСДПМ, построенная по экспериментальным данным.

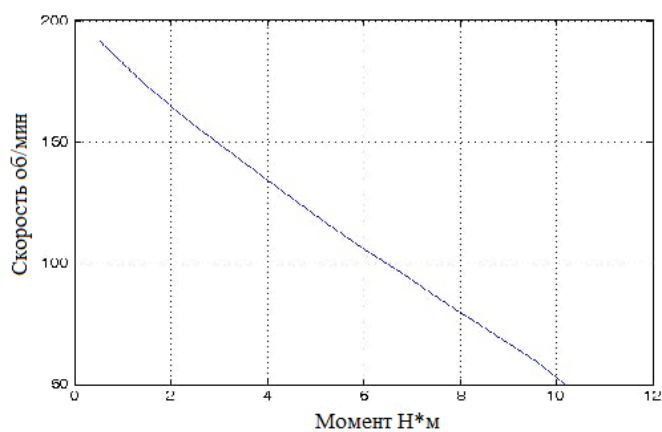


Рис. 12. Механическая характеристика разработанного двигателя

V. ВЫВОДЫ

В статье описаны этапы разработки и различные технические решения, использованные при проектировании синхронного двигателя с беспазовым статором, находящимся между двумя роторами, которые содержат сборки

магнитов по схеме Хальбаха с аксиальным направлением магнитного потока. Экспериментальные данные подтвердили сходимость с расчетными значениями.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sitapati K., Krishnan R. Performance comparisons of radial and axial field, permanent-magnet, brushless machines //IEEE Transactions on industry applications. – 2001. – Т. 37. – №. 5. – С. 1219-1226.
2. Gieras J. F. Permanent magnet motor technology: design and applications. – CRC press, 2002.
3. Nasiri-Gheidari Z., Lesani H. A survey on axial flux induction motors //Przeglad Elektrotechniczny. – 2012. – Т. 88. – №. 2. – С. 300-305.
4. Patterson D. J. et al. A comparison of radial and axial flux structures in electrical machines //2009 IEEE International Electric Machines and Drives Conference. – IEEE, 2009. – С. 1029-1035....
5. Aydin M., Huang S., Lipo T. A. Axial flux permanent magnet disc machines: A review //Conf. Record of SPEEDAM. – 2004. – Т. 8. – С. 61-71...
6. Gieras J. F., Gieras I. A. Performance analysis of a coreless permanent magnet brushless motor //Conference Record of the 2002 IEEE Industry Applications Conference. 37th IAS Annual Meeting (Cat. No. 02CH37344). – IEEE, 2002. – Т. 4. – С. 2477-2482.
7. Лукин А.Е., Перепелкина С.Ю. Аналитическая оценка метода генеративного дизайна // Сборник тезисов докладов конгресса молодых ученых. Электронное издание. - [2020, <https://kmu.itmo.ru/digests/article/3011>]. - Режим доступа: ссылка на страницу с тезисом, своб.
8. <https://www.skf.com/ru/products/rolling-bearings/principles-of-rolling-bearing-selection/bearing-selection-proces>

Демидова Г. Л., Лукичев Д. В., Поляков Н. А., Жданов И. Н., Ловлин С. Ю., Цветкова М. Х.

Университет ИТМО

ПРИМЕНЕНИЕ РЕГУЛЯТОРОВ С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ В ПРЕЦИЗИОННОМ СЛЕДЯЩЕМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ

Аннотация: К современным высокоточным оптическим системам предъявляются высокие требования по точности и динамическим режимам их работы. Данная статья раскрывает основные особенности, возникающие при управлении двигателями, обеспечивающими движение осей оптических телескопов. Представлены подходы к управлению электроприводами с использованием теории мягких вычислений как одного из возможных способов достижения требуемых прецизионных характеристик. Описаны два различных типа регуляторов с нечеткой логикой, используемых для управления угловым положением осей оптического телескопа, а также методы синтеза и настройки параметров этих регуляторов. Показано, что использование предложенных адаптивных регуляторов с нечеткой логикой с применением нейронных сетей и регуляторов с нечеткой логикой типа 2 позволяет синтезировать современные средства управления для решения задачи точного наведения оси телескопа. Проведен сравнительный анализ результатов экспериментов в рассматриваемых системах слежения с разработанными регуляторами.

Ключевые слова: электропривод, управление движением, телескоп, регуляторы с нечеткой логикой, нечеткая логика, адаптивное управление, экспертные системы, генетические алгоритмы.

I. ВВЕДЕНИЕ

Телескопы траекторных измерений последнего поколения обеспечивают высокую точность в режимах слежения и высокие динамические качества при переустановке осей оптических телескопов, что достигается путем применения современных подсистем, таких как адаптивные оптические системы, а также цифровых систем управления и силовых систем питания для управления осями опорно-поворотных устройств телескопов [1] — [4]. В настоящее время оптические системы телескопов хорошо известны и широко представлены в литературе, однако оптика не является единственным важным элементом, обеспечивающим высокоточные траекторные измерения. Телескопы становятся все более массивными и дорогими, поэтому современные системы управления их силовыми электроприводами рассчитываются и с точки зрения теории надежности [5, 6]. Наряду с телескопами для измерения траекторий спутников, используемых для поддержки GPS и подобных систем, существуют телескопы, предназначенные для слежения за техногенным космическим мусором с целью определения безопасных траекторий запуска искусственных спутников [7]. Для таких задач необходимо обеспечить прецизионное качество слежения при вращающихся массах осей телескопов от нескольких десятков килограммов до нескольких десятков тонн при воздействии нелинейных моментов трения, ветра и динамических нагрузок. Общий вид телескопов представлен на рис. 1.

Отличительной особенностью таких высокоточных приборов космического наблюдения является то, что они, как правило, устанавливаются в высоких труднодоступных горах с малой облачностью. Эти факты затрудняют специалистам обслуживание соответствующих систем управления. Электропривод опорно-поворотного устройства телескопа должен обеспечивать управление координатами азимутальной и угломестной осей с точностью до единиц угловых секунд в диапазоне скоростей вращения от нескольких десятков угловых секунд в минуту (инфранизкие скорости) до нескольких десятков угловых секунд (градусов в минуту).

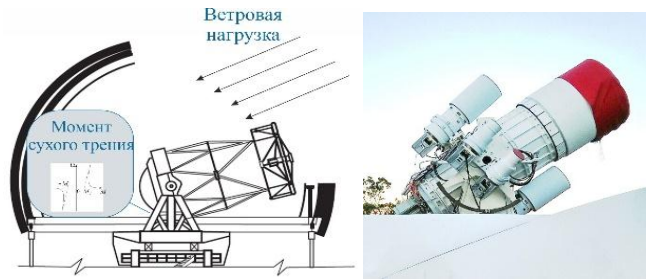


Рис. 1. а – телескоп с укрытием; б – телескоп лаборатория Pico dos Dias Observatory (Бразилия)

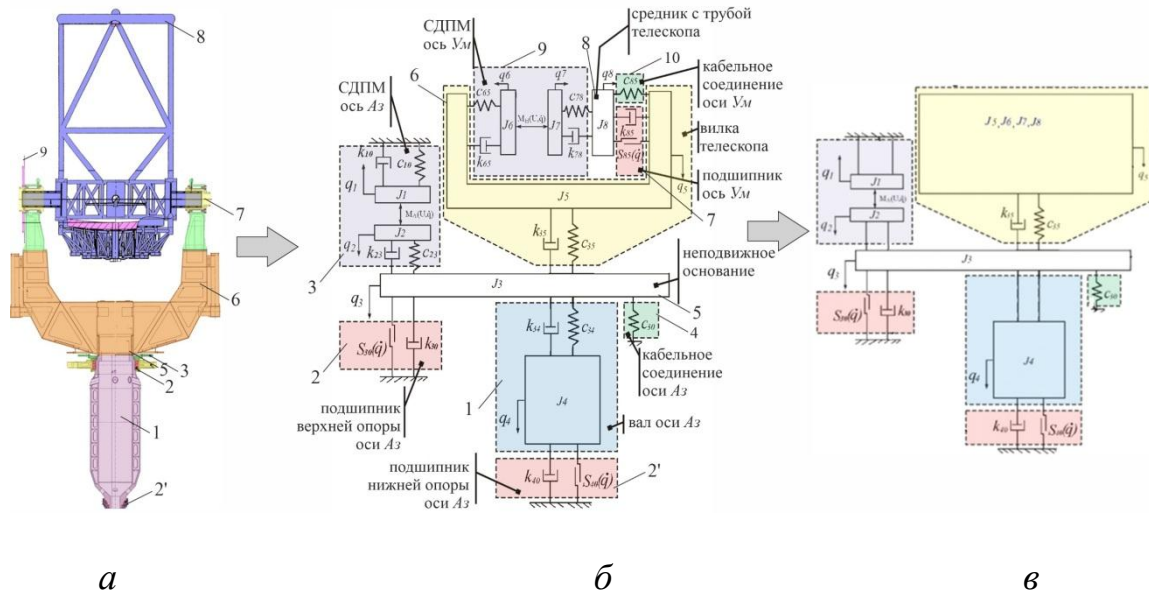


Рис. 2. а – общий вид телескопа; б – кинематическая схема телескопа; в – упрощенная схема телескопа

Наличие нелинейных разнообразных сил возмущения, удаленность объектов и высокие требования к точности вынуждают специалистов использовать интеллектуальные алгоритмы управления, обладающие такими свойствами, как самообучаемость и робастность.

II. КИНЕМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА ТЕЛЕСКОПА

Традиционно синтез систем управления телескопом начинается с идентификации параметров и принятия решения о том, какая кинематическая схема будет использована в данном проекте [8]. Определение физических параметров телескопа является уникальной задачей и проводится либо с помощью метода конечных элементов, либо путем подачи на вход системы

псевдослучайного двоичного сигнала [9] – [11]. Обычно для крупных наземных телескопов используется азимутальная монтировка, когда азимутальная ось поворотного механизма направлена по вертикали, а угломестная ось отсчитывается от плоскости горизонта.

В составе опорно-поворотной платформы наземного телескопа (рис.2а) можно выделить следующие конструктивные элементы (рис.2б):

- азимутальная ось (A_3) в составе вала (1) с моментом инерции J_4 , СДПМ с моментом инерции статора относительно неподвижного основания J_1 и моментом инерции ротора (3) относительно статора J_2 , твердотельная часть вала (5) в верхней опоре с моментом инерции J_3 , несущей верхней и нижней опорами (2 и 2' соответственно) и кабельным соединением (4) с жесткостью на кручение c_{30} ;

- вилка телескопа (6) с опорами угломестной оси с суммарным моментом инерции J_5 ;

- высотная ось ($УМ$), включающая подшипниковые узлы (7), центральную часть с трубой телескопа (8) с моментом инерции J_8 , СДПМ с инерцией статора относительно вилки J_6 и ротора относительно высотной оси J_7 и кабельным соединением (10) с жесткостью c_{85} .

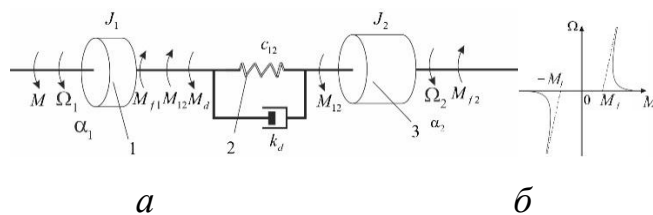


Рис. 3. а – двухмассовая кинематическая схема; б – момент сухого трения

После замены вязкоупругой связи ротора двигателя с валом оси A_3 на абсолютно жесткую, пренебрегая упругостью в области между верхним и нижним поясами подшипника в результате получаем упрощенную структуру кинематической схемы (рис.2в).

Исследования динамических свойств электроприводов показывают, что расчетные механические системы в большинстве практических случаев в результате кинематических преобразований сводятся к двухмассовой

кинематической схеме, представленной на рис.3а [12]. Сравнение АЧХ при рассмотрении различных типов кинематических схем показало, что простейшая двухмассовая схема имеет два ярко выраженных резонанса. Один из них соответствует резонансу в области низких частот, найденному по АЧХ для сложной системы.

На рис.3а входной конец оси с моментом инерции $J1$ вращается СДПМ, выходной конец оси имеет момент инерции $J2$. На рис.3а нанесены следующие обозначения: $J1$ - суммарный момент инерции ротора СДПМ и внутренних подшипников верхней опорной оси с элементами крепления подшипника к валу; $J2$ - суммарный момент инерции центральной части с трубой телескопа; c_{12} - жесткость между ротором СДПМ и осью вала U_m ; k_d - коэффициент демпфирования; M_{f1} - момент трения в подшипниках правой опоры оси вала U_m ; M_{f2} - момент трения в подшипниках левой опоры вала оси U_m . Описание кинематической схемы оси A_3 аналогично оси U_m . Движение осей характеризуется угловыми скоростями Ω_1, Ω_2 и углами позиционирования α_1, α_2 .

К системе электропривода относятся следующие крутящие моменты:

- 1) электромагнитный момент двигателя M ;
- 2) момент сухого трения (рис.3б).

$$M_{f1} = M_{f1} \text{sign}(\Omega_1), \quad M_{f2} = M_{f2} \text{sign}(\Omega_2) \quad (10)$$

- 3) момент демпфирования

$$M_d = k_d(\Omega_1 - \Omega_2) \quad (11)$$

- 4) момент упругой связи

$$M_{12} = c_{12}(\alpha_1 - \alpha_2) - M_d = c_{12} \int (\Omega_1 - \Omega_2) dt + k_d(\Omega_1 - \Omega_2) \quad (12)$$

- 5) момент инерции СДПМ, жестко связанный с нагрузкой – $J1$.
- 6) суммарный момент инерции с U_m осью трубы телескопа – $J2$;
- 7) ветровая нагрузка, представленная как функция ($M_{wind} = f_{wind}(t)$)

$$M_{wind} = \sum_{k=1}^n \sqrt{S_k(f_{k+1} - f_k)} \cdot \sin(2\pi f_k t + \varphi_k) \quad (13)$$

где $s(f)$ - случайная величина со спектральной плотностью гармонических составляющих крутящего момента. Максимальное абсолютное значение ветровой нагрузки M_{wind} не превышает максимального $M_{windMAX}$. Начальная фаза ветровой нагрузки является случайной величиной с функцией плотности вероятности в диапазоне $-\pi \leq \varphi_k \leq +\pi$.

В связи с тем, что частота механического резонанса имеет низкое значение, необходимо учитывать наличие упругих связей между входной и выходной осями. Следовательно, система уравнений для трехфазного электромеханического устройства будет такой, как показано ниже и может быть преобразована для обобщенной электромеханической системы с линеаризованной механической характеристикой (5) с соответствующей структурной схемой на рис.4.

$$\left\{ \begin{array}{l} R \cdot i_a + L \frac{d(2i_a - i_b - i_c)}{dt} - c_e \cdot \Omega \cdot \cos\left(p_p \cdot \alpha - \frac{\pi}{3}\right) = u_a, \\ R \cdot i_b + L \frac{d(2i_b - i_a - i_c)}{dt} - c_e \cdot \Omega \cdot \cos\left(p_p \cdot \alpha + \frac{\pi}{3}\right) = u_b, \\ R \cdot i_c + L \frac{d(2i_c - i_a - i_b)}{dt} - c_e \cdot \Omega \cdot \cos(p_p \cdot \alpha + \pi) = u_c, \\ J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = M - M_{f1} - M_{12}, \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12}\Omega_1 - c_{12}\Omega_2, \\ J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = M_{12} - M_{f2}, \\ \Omega_1 = \frac{d\alpha_1}{dt}, \\ \Omega_2 = \frac{d\alpha_2}{dt}. \end{array} \right. \Rightarrow$$

$$\begin{cases} T_e \frac{dM}{dt} = \beta(\Omega_0 - \Omega_1) - M, \\ J_1 \frac{d\Omega_1}{dt} = M - M_{12} - M_{f1}, \\ \frac{dM_{12}}{dt} = c_{12}\Omega_1 - c_{12}\Omega_2, \\ J_2 \frac{d\Omega_2}{dt} = M_{12} - M_{f2}, \\ \Omega_1 = \frac{d\alpha_1}{dt}, \\ \Omega_2 = \frac{d\alpha_2}{dt}. \end{cases} \quad (14)$$

Помимо управления также достаточно трудоемким является проектирование и оптимизация двигателей СДПМ системы электропривода оптических телескопов, как это отражено в работах Леонарди [13-14].

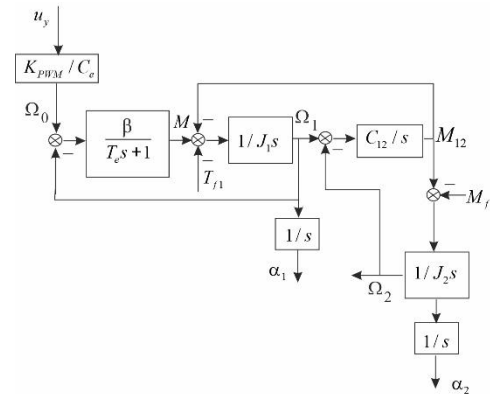


Рис. 4. Структурная схема обобщенной электромеханической системы с упругими связями

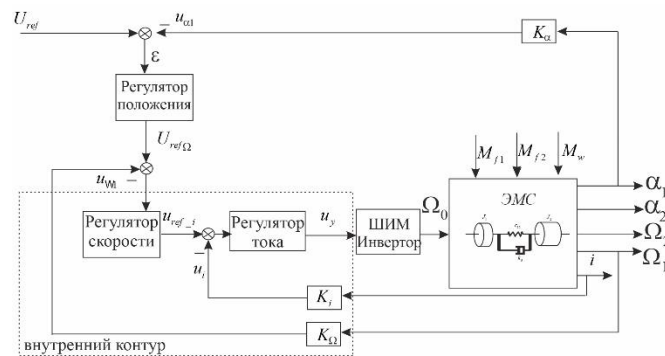


Рис. 5. Структурная схема обобщенной электромеханической системы с упругими связями

III. БАЗОВЫЕ ПРИНЦИПЫ СИНТЕЗА СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ ТЕЛЕСКОПА

Принципиальный подход синтеза алгоритмов управления осями больших телескопов предложен Янгом [20] и Толмачевым [21]. Основная идея управления таким двухмассовым объектом заключается в использовании

каскадной системы управления с внутренними контурами момента, скорости и положения, как показано на рис.5. На рис.5 использованы следующие обозначения – K_α , K_Ω , K_i – коэффициенты датчиков положения, скорости, тока соответственно. Конструктивно, установка датчика на второй массе сложна и обычно его не устанавливают. Выбор оптимальных датчиков обратной связи, обоснование выбора критерия параметров датчиков, выбор способа корректировки смещения оси регулировки между датчиком положения ротора и двигателем приведены в [15-18]. В работе [19] рассматриваются четыре метода расчета скорости на основе измерения углового положения – фильтр нижних частот, вычисление производной, α - β - γ -фильтр и среднее значение угла положения.

Для внутреннего контура момента (тока) с учетом настройки на оптимальный переходный процесс с малой некомпенсированной постоянной времени T_{μ_t} можно записать коэффициенты ПИ-регулятора:

$$\begin{aligned} K_{P_t} &= T_s R_s / (T_{\mu_t} \cdot 1,5 \cdot Z_p \psi_r \cdot K_T) \\ K_{I_t} &= K_{P_t} / T_s \end{aligned} \quad (15)$$

Для настройки внутреннего и внешнего контуров скорости используется оптимальная настройка. Для этого во внутреннем контуре используется П-регулятор с коэффициентом

$$K_{P_s} = (J_1 + J_2) K_T / (2 \cdot T_{\mu_s} K_\Omega) \quad (16)$$

Внешний контур скорости содержит I-регулятор с коэффициентом:

$$K_{I_t} = 1 / (4 T_{\mu_s}) \quad (17)$$

Для настройки контура углового положения используется параметр Симметричный оптимум. Для этого используется ПИ-регулятор с соответствующими коэффициентами

$$\begin{aligned} K_{P_\theta} &= K_\Omega / (8 \cdot T_{\mu_s} K_\theta) \\ K_{I_t} &= K_{P_\theta} / (16 \cdot T_{\mu_s}) \end{aligned} \quad (18)$$

В формулах (6) – (9) использованы следующие переменные: R_s , L_s – сопротивление и индуктивность статора; $T_s = L_s / R_s$ – электромагнитная инерция; ψ_r – магнитный поток; Z_p – количество пар полюсов; $T_{\mu_s} = 1 / (2 \cdot \Omega_{0r})$ для

реализации пропускной способности $\Omega_{0r} < \Omega_0 / \sqrt[4]{\gamma^3}$; механическая резонансная частота $\Omega_0 = \sqrt{\frac{c_{12}(J_1+J_2)}{J_1J_2}}$ и $\gamma = (J_1+J_2)/J_1$.

Более подробное описание настройки приведено в [21].

Для такой классической системы характерно наличие автоколебаний на инфранизких скоростях слежения, как показано на рис.6. Это связано с тем, что момент сухого трения описывается прерывистой функцией и резко меняет свое значение при изменении направления движения. (рис.3б). Условием отсутствия автоколебаний является движение электропривода со скоростью со значением выше амплитуды его колебаний. В связи с этой проблемой целесообразно использование неклассических методов управления, таких как адаптивный, управление в скользящем режиме, управление с предсказанием и нечеткая логика с использованием генетического алгоритма. Повышение точности позиционирования достигается установкой вышеперечисленных регуляторов либо в контур скорости, либо в контур позиционирования.

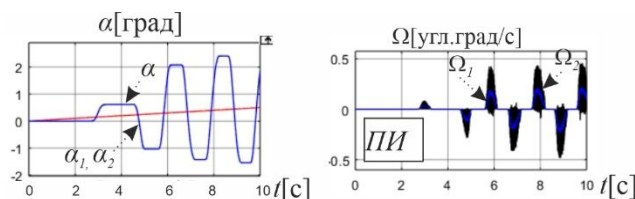


Рис. 6. Автоколебания положения и скорости на инфранизких скоростях в режиме слежения

IV. СИНТЕЗ РЕГУЛЯТОРА С НЕЧЕТКОЙ ЛОГИКОЙ

Контур положения в системе управления играет важную роль в обеспечении точного положения трубы телескопа. Основной целью использования нечеткой логики является возможность снизить чувствительность системы к изменению параметров и, соответственно, без дополнительных настроек, за счет использования адаптивных систем с регуляторами с нечеткой логикой (РНЛ), получить высокую точность управления. Основоположником нечеткой логики был Лотфи А. Заде [22] – [26] его работы по синтезу систем управления с нечеткой логикой была продолжены

Мамдани в 1974 г. [27] – [30], Сугено [31] – [37] и в настоящее время активно изучаются системы с нечеткой логикой, синтезируются ее новые структуры. Для управления техническими объектами синтезируются различные структуры РНЛ, но все они основаны либо на методе Мамдани (модель первого типа по классификации Сугено [31]), либо на методе Сугено (модель типа 2) или по методу Такаги - Сугено, что соответствует моделям третьего типа классификации Сугено [36].

Модель РНЛ 1 типа можно представить формулой (10):

$$\text{IF } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and...and } z_p(t) \text{ is } M_{ip}, \text{ THEN } y(t) = H_i, \quad i = 1, 2, \dots, r \quad (19)$$

где M_{ip}, H_i - нечеткие множества.

Данный экспертный метод не требует точной модели объекта управления и основан на доминирующей роли оператора. РНЛ 1 типа можно разделить на следующие категории:

- по количеству входных переменных, которыми могут быть: ошибка, изменение ошибки, интеграл ошибки [38] – [46];
- по структуре регулятора: адаптивный нечеткий регулятор [47] – [51], гибридный нечеткий регулятор [52] – [56], нечеткий скользящий регулятор [57] – [64];
- можно разделить на несколько методов настройки: адаптивная сетевая система нечеткого вывода (ANFIS) [65] – [71] и РНЛ с эволюционными алгоритмами [72] – [76].

Однако следует отметить, что эти структуры условны и, например, гибридные РНЛ могут быть адаптивными [59, 62].

Модель Сугено, также называемая РНЛ 2 типа (11), позволяет избежать процесса дефаззификации, поскольку выводы базы правил представляют собой число, а не набор:

$$\text{IF } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and...and } z_p(t) \text{ is } M_{ip}, \text{ THEN } y(t) = h_i, \\ i = 1, 2 \dots r \quad (20)$$

где h_i - реальные цифры.

В [31] Сугено дал подробное исследование устойчивости таких систем с помощью теории Ляпунова.

Модель Такаги - Сугено (Т - S) - РНЛ типа 3 представляется уравнением (12) как набор предикатных правил общего вида для глобальной нелинейной системы.

$$\begin{array}{l} \text{IF } z_1(t) \text{ is } M_{i1} \text{ and...and } z_p(t) \text{ is } M_{ip}, \\ \text{THEN } \begin{cases} \dot{x}(t) = A_i x(t) + B_i u(t) \\ y(t) = C_i x(t) \end{cases}, \quad i = 1, 2, \dots, r \end{array} \quad (21)$$

где M_{ij} - нечеткое множество, r - количество нечетких правил, $x(t) \in R^n$ - вектор состояния, $u(t) \in R^m$ - входной вектор воздействия, $y(t) \in R^q$ - выходной вектор, $A_i \in R^{n \times n}$, $B_i \in R^{n \times m}$, $C_i \in R^{q \times n}$, $z(t) = (z_1(t), \dots, z_p(t))$ - вектор известных переменных, которые могут быть функциями фазовых переменных, внешних возмущений или времени.

Модель РНЛ типа 3 представляет собой обобщенную модель для анализа устойчивости РНЛ, и этот тип системы можно разделить по следующим критериям:

- РНЛ типа 3 с устойчивостью по методу квадратичной функции Ляпунова;
- РНЛ типа 3 с устойчивостью по методу кусочно-квадратичной функции Ляпунова;
- РНЛ типа 3 с устойчивостью на основе метода нечеткой функции Ляпунова;
- адаптивное управление с неизвестными параметрами РНЛ типа 3.

На рис. 7 представлена структура РНЛ, в которую входят такие блоки: фаззификация, база правил, система логического вывода и дефаззификация. Структура РНЛ может быть синтезирована на основе пропорциональной (П), интегральной (И) и дифференциальной (Д) структуры. Преобразование физических переменных в нечеткие осуществляется с помощью операции фаззификации (fuzz) и определяется видом функций принадлежности. Обратное преобразование нечетких переменных в четкие осуществляется с помощью

операции дефаззификации (dfz). Во многих случаях потребуется дополнительный блок - нормализация и денормализация для адаптации входных и выходных переменных перед процедурой фаззификации и дефаззификации [28].

На практике традиционно применялись и поэтому получили наибольшее распространение треугольная, трапециевидная и колоколообразная функции принадлежности (ФП), которые можно отнести к ФП I типа. Переход от нечеткого вывода к физической величине осуществляется с помощью операций дефаззификации (dfz) таких как: центр тяжести (cog), центр площади (coa), среднее максимума (mom), индексные методы (idfz) [28]. Метод центра тяжести (cog) наиболее точен в технических системах, однако, если необходима фильтрация случайных возмущений, наиболее предпочтителен средний максимум (mom). База правил формируется с помощью лингвистических форм на основе знаний эксперта о том, какой вид управления необходим системе. Однако существуют стандартные базы правил, описывающие типичный процесс аппроксимации значений для достижения желаемых результатов. В последнее десятилетие широкое распространение получили РНД типа 2. Он имеет в структуре блока решений трехмерные функции принадлежности, которые включают в свою принадлежность область следа неопределенности (ОСН) [77] – [78].

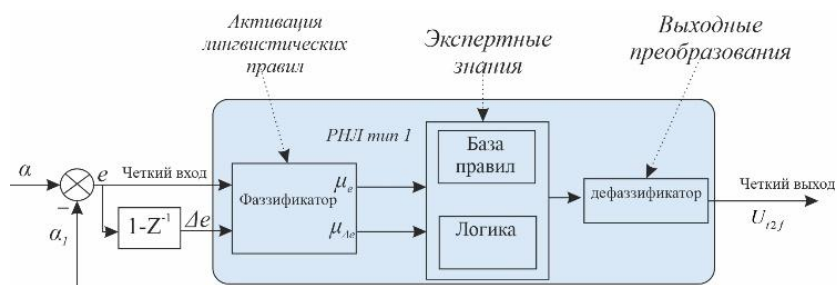


Рис. 7. РНЛ тип 1

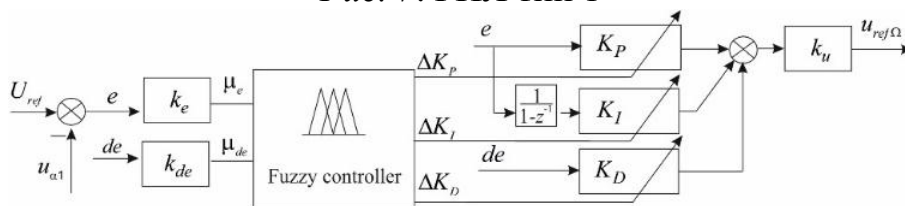


Рис. 8. Структурная схема адаптивного ПИД РНЛ

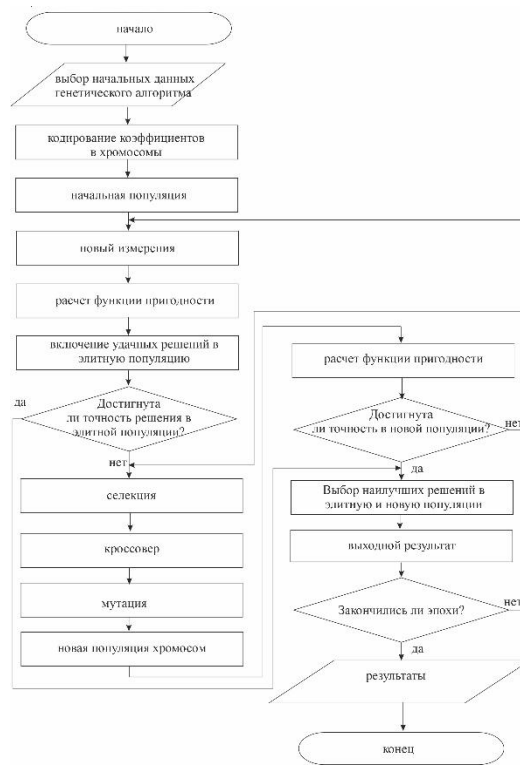


Рис. 9. Блок-схема работы генетического алгоритма адаптивного ПИД РНЛ

А. Адаптивный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) РНЛ

Работа адаптивного ПИД РНЛ основана на алгоритме Мамдани и использует треугольные функции принадлежности с нормированным диапазоном $[-1...1]$: ошибки (e) и производная ошибки (de) [79] – [81]. Блок-схема адаптивного ПИД РНЛ показана на рис. 8. Регулятор имеет два входа – e и de , и три выходных сигнала – пропорциональный, интегральный и дифференциальный. Также схема содержит - нормализацию сигнала после дефаззификации; - нормализацию сигнала перед фаззификацией. Для настройки этих коэффициентов, а также коэффициентов ПИД-регулятора K_P , K_I , K_D используется генетический алгоритм.

Выходной сигнал может быть представлен в виде (13):

$$U_{ref\Omega} = k_u \cdot [(K_P \cdot z^{-1} + \Delta K_P) \cdot e(z) + (K_I \cdot z^{-1} + \Delta K_I) \cdot \frac{e(z)}{1 - z^{-1}} + (K_D \cdot z^{-1} + \Delta K_D) \cdot (1 - z^{-1})e(z)] \quad (22)$$

Блок-схема работы генетического алгоритма, представленная на рис.9 и включает операции селекции, скрещивания, мутации. В качестве критерия

остановки генетического алгоритма мы использовали число поколений и минимум функции пригодности:

$$F = \sum_{i=1}^n \frac{|u_{\Omega i} - u_{ref}|}{U_{\Omega \max}} + \sum_{i=1}^n \frac{|u_{\alpha i} - U_{ref}|}{U_{\alpha \max}} \quad (23)$$

где $u_{\Omega i}, u_{\alpha i}$ - текущие сигналы скорости и положения, u_{ref}, U_{ref} - заданные значения скорости и положения, $U_{\Omega \max}, U_{\alpha \max}$ - максимально возможное в системе значение скорости и положения.

В. Автоматически настраиваемый адаптивный пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) РНЛ

Каждый входной сигнал ошибки регулятора (e) и производной ошибки (de), а также все выходные сигналы: пропорциональный ΔK_p , интегральный ΔK_i и дифференциальный ΔK_d описываются как лингвистические переменные с использованием соответственно значений: E_1, E_2, \dots, E_{n1} , $DE_1, DE_2, \dots, DE_{n2}$, P_1, P_2, \dots, P_{n3} , I_1, I_2, \dots, I_{n4} , D_1, D_2, \dots, D_{n5} (рис. 10). Нечеткая система может быть описана с помощью трех исходных таблиц нечетких правил (рис. 11).

Нечеткие правила могут быть представлены (15):

$$\begin{array}{l}
 \text{IF } e \text{ is } E_1 \text{ AND } de \text{ is } DE_1, \text{ THEN } \Delta K_p \text{ is } P_{11}, \Delta K_i \text{ is } I_{11}, \Delta K_d \text{ is } D_{11} \\
 \vdots \\
 \text{IF } e \text{ is } E_2 \text{ AND } de \text{ is } DE_{n2}, \text{ THEN } \Delta K_p \text{ is } P_{2n2}, \Delta K_i \text{ is } I_{2n2}, \Delta K_d \text{ is } D_{2n2} \\
 \vdots \\
 \text{IF } e \text{ is } E_{n1} \text{ AND } de \text{ is } DE_{n2}, \text{ THEN } \Delta K_p \text{ is } P_{n1n2}, \Delta K_i \text{ is } I_{n1n2}, \Delta K_d \text{ is } D_{n1n2}
 \end{array} \quad (24)$$

где $P_{ij} \in \{P_1, P_2, \dots, P_{n3}\}$, $I_{ij} \in \{I_1, I_2, \dots, I_{n4}\}$,
 $D_{ij} \in \{D_1, D_2, \dots, D_{n5}\}$ для $1 \leq i \leq n_1, 1 \leq j \leq n_2$.

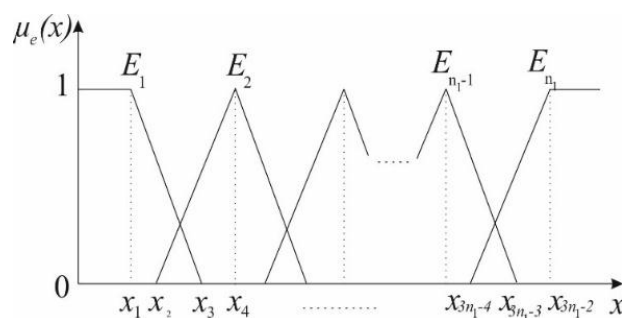


Рис. 10. Функции принадлежности ошибки

μ_6	E_1	...	E_7
μ_6/bit			
DE_1	P_{11}	...	P_{71}
DE_2	P_{12}	...	P_{72}
...			
DE_7	P_{17}	...	P_{77}

μ_6	E_1	...	E_7
μ_6/bit			
DE_1	I_{11}	...	I_{71}
DE_2	I_{12}	...	I_{72}
...			
DE_7	I_{17}	...	I_{77}

μ_6	E_1	...	E_7
μ_6/bit			
DE_1	D_{11}	...	D_{71}
DE_2	D_{12}	...	D_{72}
...			
DE_7	D_{17}	...	D_{77}

а)

б)

в)

Рис. 11. Исходные таблицы нечетких правил нечеткого адаптивного ПИД-регулятора для: а – пропорциональной составляющей; б – интегральной составляющей; в – дифференциальной составляющей

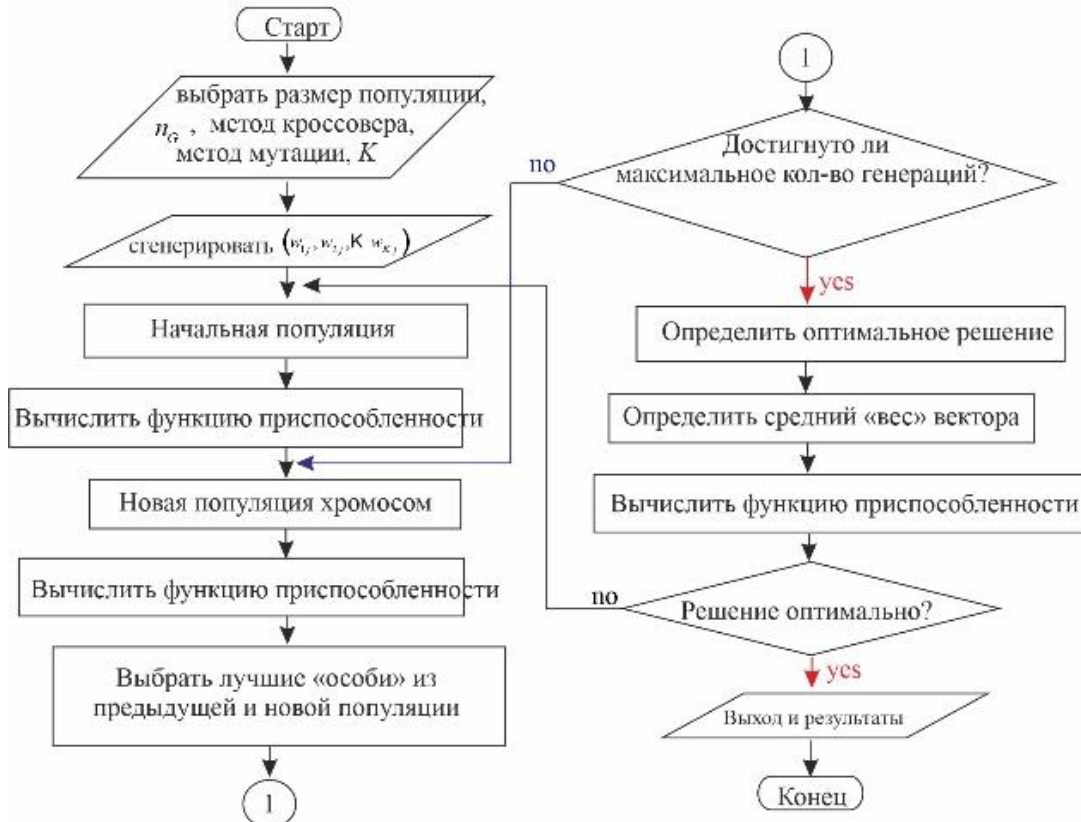


Рис. 12. Блок-схема работы генетического алгоритма автоматически настраиваемого адаптивного ПИД РНЛ

После задания (ФП) (см. рис. 12) их можно математически описать с помощью соответствующих уравнений, например, для ФП ошибки получаем:

$$f_{E_trap} = \begin{cases} 0, & x \leq x_{3n_1-7}, \quad x_{3n_1-1} \leq x \\ \frac{x - x_{3n_1-7}}{x_{3n_1-5} - x_{3n_1-7}}, & x_{3n_1-7} < x \leq x_{3n_1-5} \\ \frac{x_{3n_1-1} - x}{x_{3n_1-1} - x_{3n_1-5}}, & x_{3n_1-5} < x < x_{3n_1-1} \end{cases} \quad (25)$$

Одним из недостатков бинарного представления хромосом является то, что увеличение длины битовой строки приводит к увеличению размера

популяции [82]. Напротив, алгоритмы кодирования RLE, как правило, работают с непрерывным диапазоном допустимых значений переменных. Таким образом, благодаря отсутствию двоично-десятичных преобразований при вычислении значений фитнес-функций и уменьшению размера хромосом этот тип алгоритмов позволяет сократить количество вычислительных процедур на каждом этапе эволюции. При этом начальная популяция задается некоторыми условными границами в диапазоне допустимых значений. Также условием такой инициализации является равномерное распределение переменных, входящих в совокупность, по диапазонам допустимых значений.

Таким образом, входные ФП ($E_1, E_2, \dots, E_{n_1}, DE_1, DE_2, \dots, DE_{n_2}$) можно описать параметрами $(3n_1 - 2)$ и $(3n_2 - 2)$ соответственно (рис.10). Эти параметры используются для описания хромосом. Также каждой хромосоме $(n_1 \cdot n_2)$ нужны параметры из выходных нечетких правил, $P_{n_1 n_2}, I_{n_1 n_2}$ и $D_{n_1 n_2}$, где $1 \leq n_1 \leq 7, 1 \leq n_2 \leq 7$. Следовательно, наша хромосома состоит из $(3n_1 - 2 + 3 \cdot n_1 \cdot n_2 + 3n_2 - 2) = (3n_1 + 3 \cdot n_1 \cdot n_2 + 3n_2 - 4)$ генов.

Диапазон для каждого гена хромосомы $X = (3n_1 - 2 + 3 \cdot n_1 \cdot n_2 + 3n_2 - 2) = (3n_1 + 3 \cdot n_1 \cdot n_2 + 3n_2 - 4)$:

$$\sum_{i=1}^{3n_1-2} x_i = e_{\max} - e_{\min}; \quad \sum_{i=3n_1-2}^{3n_1+3n_2-4} x_i = de_{\max} - de_{\min} \quad (26)$$

где $[e_{\min}, e_{\max}], [de_{\min}, de_{\max}]$ соответствует $[x_{\min}, x_{\max}]$.

Формулы (18) – (19) использовались для достижения равенства (17) во время выполнения генетического алгоритма (ГА).

$$x'_i = (e_{\max} - e_{\min}) \frac{x_i}{\sum_{i=1}^{3n_1-2} x_i} \quad \text{for } 1 \leq i \leq 3n_1 - 2 \quad (27)$$

$$x'_i = (de_{\max} - de_{\min}) \frac{x_i}{\sum_{i=3n_1-2}^{3n_1+3n_2-4} x_i} \quad \text{for } 3n_1 - 2 \leq i \leq 3n_1 + 3n_2 - 4 \quad (28)$$

Арифметический кроссовер используется для вычисления двух новых x'_1, x'_2 как:

$$\begin{aligned} x'_1 &= \lambda x_1 + (1 - \lambda) x_2, \\ x'_2 &= \lambda x_2 + (1 - \lambda) x_1 \end{aligned} \quad (29)$$

где $\lambda \in (0,1)$ переменная, связанная с количеством прошедших эпох.

В исследовании использовался неоднородный тип мутации. При таком подходе изменяемый ген принимает случайное значение из интервала его изменения как:

$$x'_m = \begin{cases} x_m + (x_m^{hi} - x_m) r \left(1 - \frac{n_g}{n_G}\right)^b, & \varpi = 0 \\ x_m - (x_m - x_m^{low}) r \left(1 - \frac{n_g}{n_G}\right)^b, & \varpi = 1 \end{cases} \quad (30)$$

здесь $r \in [0,1]$ – случайная величина, n_g – номер поколения, n_G – номер максимального поколения, b – степень неравномерности, $[x_m^{low}, x_m^{hi}]$ – диапазон x_m .

Как упоминалось выше, основная задача Генетического алгоритма заключается в нахождении функции пригодности. Поэтому необходимо оценить значение пригодности каждого решения, как показано в [82].

$$fitness = w_1 h_1(x) + w_2 h_2(x) + \dots + w_k h_k(x) \quad (31)$$

$$h_i(x) = \frac{f_i(x)}{\max_{y \in \Theta} \{f_i(y)\}} \text{ for } i = 1, 2, \dots, K \quad (32)$$

где (w_1, w_2, \dots, w_k) – весовой вектор, Θ – допустимое пространство решений.

$$w_i = \frac{ran_i}{(ran_1 + ran_2 + \dots + ran_k)} \text{ for } i = 1, 2, \dots, K \quad (33)$$

где $ran_1 + ran_2 + \dots + ran_k$ – положительные реальные числа.

Вектор среднего веса определялся как

$$\bar{w}_i = \frac{\sum_{j=1}^N w_{ij} \cdot h_i(x_{opt,j})}{\sum_{j=1}^N h_i(x_{opt,j})} \text{ for } i = 1, 2, \dots, K \quad (34)$$

где x_{opt} – оптимальное решение.

В данном исследовании использованы следующие параметры: частота кроссинговера – 0,8, частота мутаций – 0,2, размер популяции – 50, число максимальных поколений – 400. Блок-схема алгоритма представлена на рис.11.

V. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

Для проверки разработанных алгоритмов использовался лабораторный стенд, представленный на рис.13. Он состоит из электромеханического преобразователя (ЭМП), персонального компьютера (ПК) и преобразователя частоты (ПЧ). Структурная схема лабораторной системы представлена на рис. 14. ЭМП состоит из СДПМ и упругих связей посредством муфты между двигателем и нагрузкой. Нагрузка представляет собой наборные кольца. В качестве датчика обратной связи использовался оптический энкодер Renishaw RESM20 с разрешением 0,40 угл. с (0,0001 град). На ПК через интерфейс MATLAB с программным обеспечением Real-Time Windows Target реализованы все типы контроллеров нечеткой логики. В MATLAB созданы регуляторы скорости и различных типов положения. Регулятор тока (крутящего момента) был реализован аппаратно на микроконтроллере DSP. ПК взаимодействует с ПЧ через интерфейс CAN, используя дополнительную плату в ПК. Данные передавались между ними с фиксированной частотой дискретизации 0,001 с. ПЧ состоит из преобразователей переменного/постоянного тока, трансформатора, ШИМ-преобразователя и контроллера приводов. Параметры СДПМ и установки приведены в таблице 1.

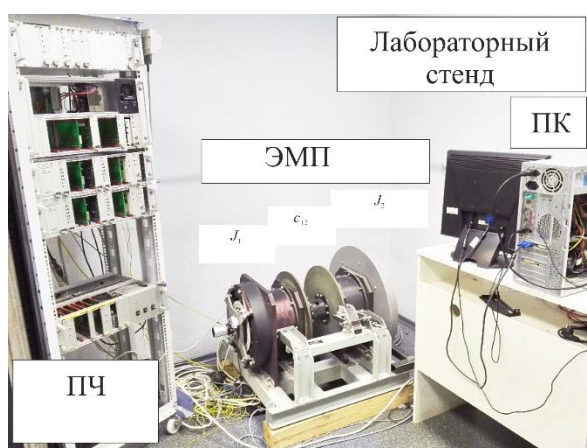


Рис. 13. Лабораторный стенд

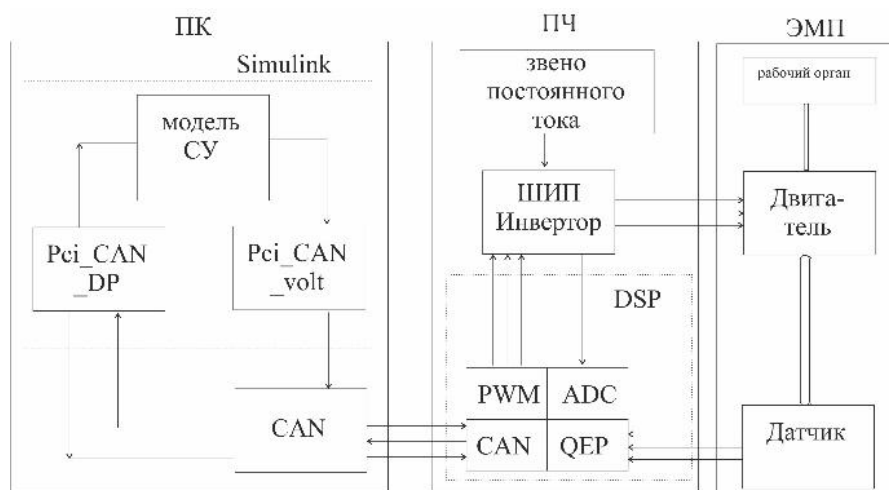


Рис. 14. Структурная схема работы стенда

Таблица 1

Данные СДПМ

Параметр	Значение	Единицы измерения
Количество пар полюсов	24	-
Сопротивление статора	1.2	Ом
Электромагнитная постоянная	8	мс
Коэффициент против ЭДС	3.58	В·с/рад
Постоянная по моменту	5.09	Нм/А
c_{12}	$4.19 \cdot 10^5$	Нм/рад
J_1	0.83	кг·м ²
J_2	9.23	кг·м ²
Резонансная частота	742.1	рад/с
Антирезонансная частота	213.2	рад/с

В работе телескопа есть два основных режима - слежения и наведения. На малой скорости анализ следует сосредоточить на следящем режиме, т. к. наведение телескопа обычно реализуется с достаточно высокой скоростью и в переходном режиме автоколебаний нет. Режим слежения в данном исследовании обладает следующими основными характеристиками: максимальное ускорение 5 угл.град/с², максимальная скорость 1 угл.с/с ($2,27 \cdot 10^{-4}$ угл.град/с). В качестве возмущений в этой системе рассматривались крутящий момент от кабельного соединения ($M_{\text{cable}} = 60$ Нм) и крутящий момент ветровой нагрузки, который представлялся в виде сигнала белого шума

с амплитудой ± 200 Нм (рис. 15). Все эти помехи отсутствуют в реальном лабораторном оборудовании и задавались программно.

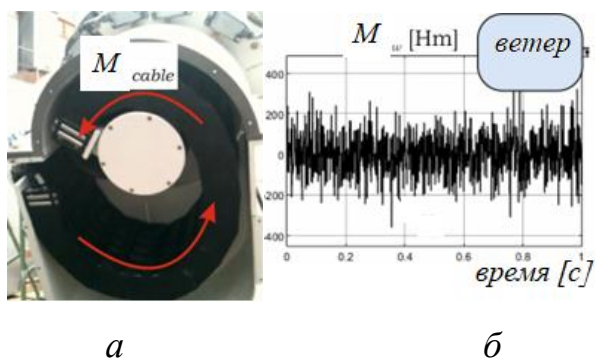


Рис. 15. а – момент натяжения кабелей; б – ветровой момент

Временная характеристика в переходном режиме с использованием ПИ-регулятора в контуре управления положением показана на рис.16. В системе на малой скорости появились автоколебания, которые будут усиливаться при изменении некоторых параметров системы (например, момента инерции). Рис.16 соответствует результатам моделирования и эксперимента в электромеханической системе. В экспериментальном стенде нет датчика на второй массе, поэтому информация о второй массе отсутствует. По этой причине в имитационной модели есть информация только о положении первой массы, а в системе появилась ошибка положения второй массы, равная 0,03 угл. град, вызванная отсутствием датчика.

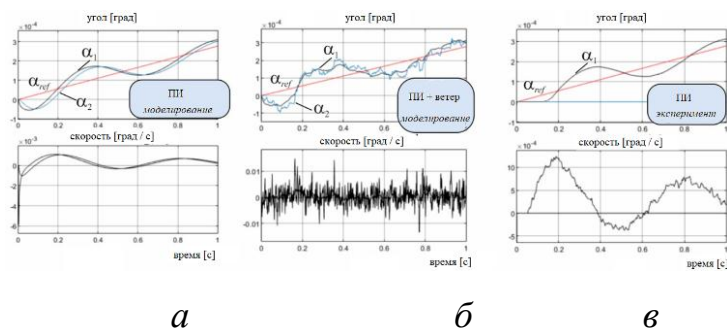


Рис. 16. Переходные процессы в системе с ПИ-регулятором в контуре положения:

а – результаты моделирования без ветровой нагрузки; б – с ветровой нагрузкой; в – экспериментальные результаты

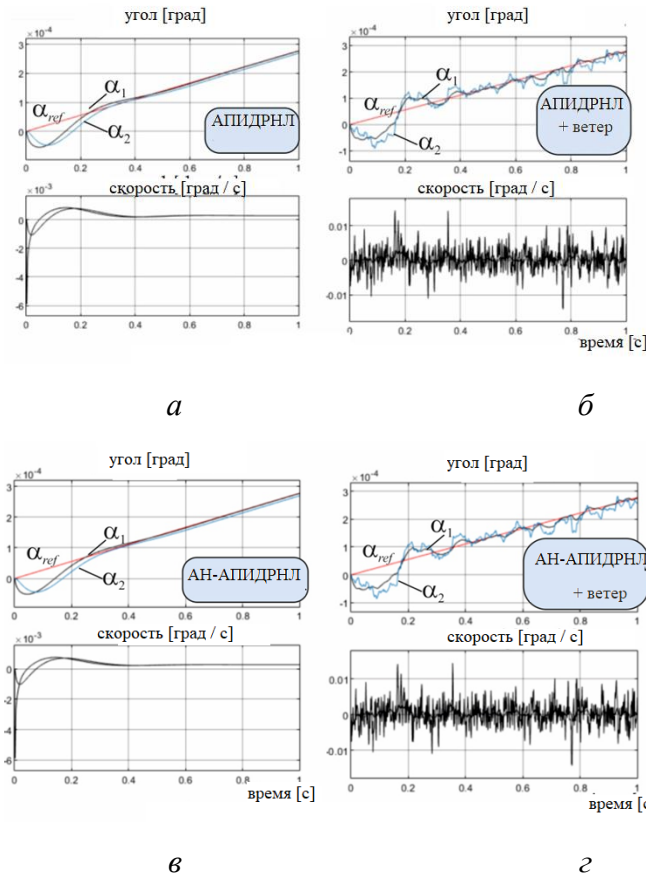


Рис. 17. Переходные процессы в системе с РНЛ в контуре положения:
а – результаты моделирования АПИДРНЛ без ветровой нагрузки;
б – АПИДРНЛ с ветровой нагрузкой; *в* – результаты моделирования АН-АПИДРНЛ без ветровой нагрузки; *г* – АН-АПИДРНЛ с ветровой нагрузкой

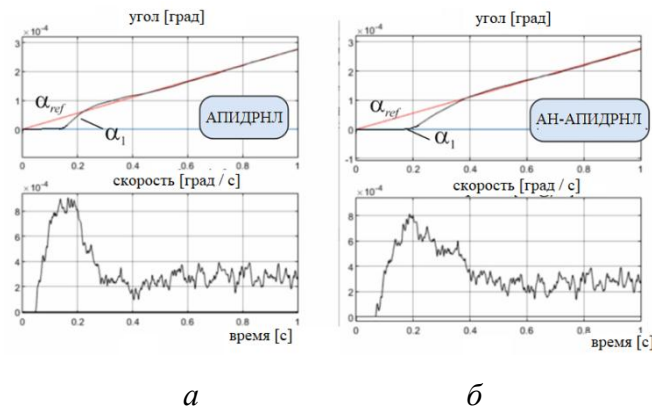


Рис. 18. Переходные процессы в системе с РНЛ в контуре положения:
а – результаты эксперимента АПИДРНЛ; *б* – АН-АПИДРНЛ

Таблица 2

Результаты имитационного моделирования

	Тип регулятора	ПИ	АПИДРНЛ	АН-АПИДРНЛ
	СКО [град]			
Без ветровой нагрузки	СКО □1 [град]	0.1211	0.0061	0.0069
	СКО □2 [град]	0.1297	0.0304	0.0301
С ветровой нагрузкой	СКО □1 [град]	0.1322	0.0101	0.0105
	СКО □2 [град]	0.1423	0.0478	0.0482

Таблица 3

Экспериментальные результаты

Тип регулятора	ПИ	АПИДРНЛ	АН-АПИДРНЛ
СКО [град]			
СКО □1 [град]	0.1164	0.0072	0.0071

Результаты моделирования системы с рассматриваемыми контроллерами адаптивным ПИД РНЛ (АПИДРНЛ) и автоматически настраиваемом адаптивном ПИД РНЛ (АН-АПИДРНЛ) показаны на рис.17. Показано, что автоколебания устраняются при использовании всех типов контроллеров РНЛ. Все системы устойчивы к ветровой нагрузке. Численные показатели в результатах моделирования среднеквадратичной ошибки положения (СКО) первой и второй массы приведены в табл. 2. Показано, что в установившемся режиме СКО всех РНЛ примерно равны.

Результаты эксперимента показаны на рис.18. Они состоят только из информации от первого угла массы из-за отсутствия датчика на второй массе. Неравномерность измеряемой скорости связана с режимом ШИМ. Среднее значение скорости равно эталонному и составило 2,2710-4 град/с. Устранены автоколебания в системе с использованием РНЛ. Численные измеренные данные представлены в табл. 3 и показывают, что СКО положения одинаковы для всех РНЛ и в 16 раз меньше по сравнению с применением ПИ-регулятора положения.

VI. ВЫВОДЫ

Промышленное применение систем и приборов с функцией GPS ставит задачу точного слежения за спутниками с целью коррекции их траекторий, а это, в свою очередь, предъявляет определенные требования к характеристикам телескопов, работающих при малых скоростях вращения оптических осей. Регулятор с нечеткой логикой может решить проблему автоколебаний положения сигнала на низкоскоростном режиме работы телескопа. Часто синтез РНЛ до конца не налажен и требует участия специалиста. Синтез АПИДРНЛ и АН-АПИДРНЛ с использованием генетического алгоритма проблему автоматической настройки позиционного регулятора и устранил автоколебания при работе на инфранизких скоростях движения. Результаты моделирования и экспериментов показали, что рассматриваемые системы обладают меньшим перерегулированием и высоким быстродействием при действии нелинейных возмущений момента нагрузки по сравнению с традиционным ПИ-регулятором. Все рассмотренные РНЛ в контуре положения успешно управляют двухмассовой системой как частным случаем телескопа и обладают робастностью к сигналам возмущения.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. K. Kozłowski et al., “High Precision Automated Astronomical Mount,” in *Automation* 2019, 2020, pp. 299–315.
2. C. Molfese, P. Schipani, M. Capaccioli, G. Sedmak, and S. D’Orsi, “Survey Telescope control electronics,” in *2008 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion*, 2008, pp. 523–527, doi: 10.1109/SPEEDHAM.2008.4581188.
3. Sarlette and R. J. Sepulchre, “Control limitations from distributed sensing: Theory and Extremely Large Telescope application,” *Automatica*, vol. 50, no. 2, pp. 421–430, 2014, doi: <https://doi.org/10.1016/j.automatica.2013.12.014>.
4. Зверев В.А. Большой телескоп азимутальный // Изв. Вузов Приборостроение 2010. Т. 53, № 3 с.39-51.
5. Jantzen, *Foundations of Fuzzy Control: A Practical Approach*, 2nd Edition. 2013.
6. D. L. Huaguang Zhang, “Fuzzy Modeling and Fuzzy Control,” in *Control Engineering*, 2006, p. 416.
7. E. E. K. Paul P. Wang, Da Ruan, *Fuzzy Logic A Spectrum of Theoretical & Practical Issues*. 2007.
8. P.Y. Bely. *The Design and Construction of Large Optical Telescopes*. NY, USA: Springer-Verlag New York, Inc.; 2003.

9. Ильина А.Г. Параметрическая идентификация вентильного электропривода азимутальной оси телескопа траекторных измерений // Научно-технический вестник СПбГУ ИТМО. – 2010. – № 68. – С. 33–38.
10. Arn Wahrburg, Edo Jelavic, Silke Klose, Kim D.Listmann. Robust, “Semi-Automatic Identification of Compliantly Coupled Two-Mass Systems” *IFAC-Papers OnLine*, Vol.50, Is.1, 2017, pp. 14569-14574
11. Can Wang, Ming Yang, Weilong Zheng, Qinan Ni, Ralph Kennel, Dianguo Xu. “External mechanical parameters identification of the elastic two-mass system with backlash” *2017 IEEE 12th International Conference on Power Electronics and Drive Systems (PEDS)*, 2017, pp. 593-598
12. Исупов А. Н., Исупов К. С., Храмов С. Н. Определение амплитудно-частотных характеристик альт- азимутального опорно-поворотного устройства крупногабаритного наземного телескопа // Изв. вузов. Приборостроение 2008. Т. 51, № 6. С. 30—37
13. F. Leonardi, M. Venturini, A. Vismara, “PM motors for direct driving optical telescope” *IEEE Industry Applications Magazine*, Vol. 2, Is. 4, 1996, pp. 10 – 16
14. F. Leonardi, M. Venturini, A. Vismara, “Design and optimization of very high torque, low ripple, low cogging PM motors for direct driving optical telescope” *Proceedings of 1994 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting*, 1994, pp. 272-278
15. А.В. Гурьянов, И.Н. Жданов, А.Г. Ильина, А.А. Усольцев. Коррекция рассогласования осей датчика положения и синхронного двигателя // Изв. Вузов. Приборостроение. 2008. С. 57-62.
16. Садовников М.А. Измерение скорости движения силового электропривода с помощью оптических датчиков угла // Изв. Вузов. Приборостроение. 2008. С 52-57
17. Денисов К.М., Жданов И.Н. Оптимизация каналов скорости и положения прецизионных следящих электроприводов // Изв. Вузов. Приборостроение. 2008. Т.51 №6 с.45-52
18. Carlo Trigona, Bruno Ando, Salvatore Baglio, “Measurements and Analysis of Induced Vibrations in Optical Telescopes” *2018 15th International Multi-Conference on Systems, Signals & Devices (SSD)*, pp.1476-1480, 2018
19. Stefan Brock, “Estimation of low rotational speed based on the measurement of absolute angular position” *2016 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE)*, pp.1-6, 2016
20. Shihai Yang, “Study of Control Method for Large Telescope with Friction Drive” *2009 International Conference on Computational Intelligence and Software Engineering*, pp.1-4, 2009
21. Толмачев В. А. Синтез следящего электропривода оси опорно-поворотного устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2008. Т. 51. № 6. С. 68—72
22. L. A. Zadeh, “Fuzzy Sets” *Information and Control* 8, P.338-353, 1965
23. L. A. Zadeh, “Fuzzy algorithm,” *Inform. Control*, vol. 12, pp. 94–102, 1968.
24. L. A. Zadeh, “Similarity relations and fuzzy orderings,” *Inform. Sci.*, vol. 3, pp. 177–200, 1971.
25. L. A. Zadeh, “Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. SMC-3, no. 1, pp. 28–44, Jan. 1973.
26. L. A. Zadeh, “The concept of a linguistic variable and its application to approximate reasoning: I, II, III,” *Inform. Sci.*, vol. 8, pp. 199–251, 1975.
27. E. H. Mamdani, “Application of fuzzy algorithms for simple dynamic plant,” *Proc. Inst. Elect. Eng.*, vol. 121, pp. 1585–1588, 1974.
28. E. H. Mamdani and S. Assilian, “An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller,” *Int. J. Man Mach. Stud.*, vol. 7, pp. 1–13, 1975.
29. P. J. King and E. H. Mamdani, “The application of fuzzy control systems to industrial process,” *Automatica*, vol. 13, pp. 235–242, 1977.
30. P. Pappis and E. H. Mamdani, “A fuzzy logic controller for a traffic junction,” *IEEE Trans. Syst., Man, Cybern.*, vol. 7, no. 10, pp. 707–717, Oct. 1977.
31. M. Sugeno, *Industrial Applications of Fuzzy Control*. New York: Elsevier, 1985.

32. Tomohiro Takagi; Michio Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control' IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Vol. SMC-15, Is. 1, pp. 116 - 132, 1985, , DOI: 10.1109/TSMC.1985.6313399
33. M. Sugeno and M. Nishida, "Fuzzy control of model car," Fuzzy Sets Syst., vol. 16, pp. 103–113, 1985.
34. Tanaka and M. Sugeno, "Stability analysis and design of fuzzy control systems," Fuzzy Sets Syst., vol. 12, pp. 135–156, 1992.
35. M. Sugeno and T. Yasukawa, "A fuzzy-logic-based approach to qualitative modeling," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 1, no. 1, pp. 7–31, Feb. 1993.
36. M. Sugeno, "On stability of fuzzy systems expressed by fuzzy rules with singleton consequents," IEEE Trans. Fuzzy Syst., vol. 7, no. 2, pp. 201–224, Apr. 1999.
37. T. Taniguchi and M. Sugeno, "Stabilization of nonlinear systems based on piecewise Lyapunov functions," in Proc. 13th IEEE Int. Conf. on Fuzzy Systems, Budapest, Hungary, Jul. 2004, pp. 1607–1612.
38. Paul P. Wang, Da Ruan, Etienne E. Kerre. Fuzzy Logic A Spectrum of Theoretical & Practical Issues' Springer Berlin Heidelberg, 2007, DOI:10.1007/978-3-540-71258-9
39. Trillas, Enric, Eciolaza, Luka. Fuzzy Logic an Introductory Course for Engineering Students' Springer International Publishing, 2015, DOI:10.1007/978-3-319-14203-6
40. Harris J. Fuzzy Logic Applications in Engineering Science' Springer Netherlands, 2006, DOI: 10.1007/1-4020-4078-4
41. G.L. Demidova, A.Yu. Kuzin, D.V. Lukichev. Application Features of Fuzzy Controllers on Example of DC Motor Speed Control' Scientific and Technical Journal of Information Technologies, Mechanics and Optics, 2016, vol. 16, no. 5, pp. 872–878
42. Liping Guo; John Y. Hung; R. M. Nelms. Evaluation of DSP-Based PID and Fuzzy Controllers for DC–DC Converters' IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. V.56. Is.6. P.2237-2248. doi: 10.1109/TIE.2009.2016955
43. Preeti, Dr. Narendra Singh Beniwal. Comparison of Conventional and Fuzzy P/PI/PD/PID Controller for Higher Order Non Linear Plant with High Dead Time' International Journal of Scientific and Research Publications. 2012. V. 2. Is. 8. P. 377-382
44. Paul-I-Hai Lin; Sentai Hwang; J. Chou. Comparison on fuzzy logic and PID controls for a DC motor position controller' IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Proceedings of 1994. 1994. V.3. P. 1930 – 1935. doi: 10.1109/IAS.1994.377695
45. M. Santos; S. Dormido; J. M. de la Cruz, Fuzzy-PID controllers vs. fuzzy-PI controllers' Proceedings of IEEE 5th International Fuzzy Systems. 1996. V.3. P. 1598 – 1604. doi: 10.1109/FUZZY.1996.552571
46. Lukichev D.V., Demidova G.L. Fuzzy Control of the Position Servo Motor Drives with Elasticity and Friction' Latest trends on systems - volumes I: Proceedings of the 18th International Conference on Systems (part of CSCC '14) - 2014, pp. 157-160
47. Do Xuan Phu and Seung-Bok Choi, "A New Adaptive Fuzzy PID Controller Based on Riccati-Like Equation with Application to Vibration Control of Vehicle Seat Suspension" *Appl. Sci.* 9(21), 4540, 2019; <https://doi.org/10.3390/app9214540>
48. Dmitry V. Lukichev; Galina L. Demidova; Stefan Brock. Fuzzy adaptive PID control for two-mass servo-drive system with elasticity and friction' 2015 IEEE 2nd International Conference on Cybernetics (CYBCONF). 2015, pp. 443 - 448. doi: 10.1109/CYBConf.2015.7175975
49. Chun-Tang Chao, Nana Sutarna, Juing-Shian Chiou and Chi-Jo Wang, "An Optimal Fuzzy PID Controller Design Based on Conventional PID Control and Nonlinear Factors", *Appl. Sci.* 9(6), 1224, 2019; <https://doi.org/10.3390/app9061224>
50. Mann G.K.I., Bao-Gang Hu., Gosine R.G. Analysis of direct action fuzzy PID controller structures. - IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics, Part B, vol. 29, Issue 3, Jun 1999, p. 371 - 388.
51. R. Kandiban, R. Arulmozhiyal. Speed Control of BLDC Motor Using Adaptive Fuzzy PID Controller' Procedia Engineering.2012. Vol. 38. P. 306-313. doi:10.1016/j.proeng.2012.06.039

52. T. Brehm; K. S. Rattan. Hybrid fuzzy logic PID controller” Proceedings of the IEEE 1993 National Aerospace and Electronics Conference-NAECON 1993. 1993. vol.2. P. 807 - 813, doi: 10.1109/NAECON.1993.290839
53. Wei Li. Design of a hybrid fuzzy logic proportional plus conventional integral-derivative controller” IEEE Transactions on Fuzzy Systems. 1998. V. 6, Is. 4, P. 449 - 463, DOI: 10.1109/91.728430
54. W. Li; X. G. Chang; J. Farrell; F. M. Wahl. Design of an enhanced hybrid fuzzy P+ID controller for a mechanical manipulator” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part B (Cybernetics). 2001. V. 31. Is. 6. P. 938 - 945, DOI: 10.1109/3477.969497
55. A. Cortajarena; J. De Marcos; P. Alvarez; F. J. Vicandi; P. Alkorta. Indirect Vector Controlled Induction Motor with four Hybrid P+Fuzzy PI Controllers” 2007 IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2007. P. 197 - 202, DOI: 10.1109/ISIE.2007.4374598
56. Vimala Vindhya; Venkat Reddy. PID-Fuzzy logic hybrid controller for a digitally controlled DC-DC converter” 2013 International Conference on Green Computing, Communication and Conservation of Energy (ICGCE). 2013. P. 362 - 366, doi: 10.1109/ICGCE.2013.6823461
57. V.I. Utkin. Sliding Modes in Control and Optimization” Springer, 1992, p.286
58. Juntao Fei, Yunmei Fang and Zhuli Yuan, "Adaptive Fuzzy Sliding Mode Control for a Micro Gyroscope with Backstepping Controller", *Micromachines* 11(11), 968, 2020; <https://doi.org/10.3390/mi11110968>
59. Bonivento, C. Fantuzzi and L. Martin. Adaptive fuzzy logic controller synthesis via a sliding mode approach” *European Control Conference ECC 95*, Vol. 2, 1995
60. J. S. Glower; J. Munighan. Designing fuzzy controllers from a variable structures standpoint” IEEE Transactions on Fuzzy Systems, Vol. 5, Is. 1, pp. 138 - 144, 1997, DOI: 10.1109/91.554460
61. Byung-Keun Song, Jin-Hee An and Seung-Bok Choi, "A New Fuzzy Sliding Mode Controller with a Disturbance Estimator for Robust Vibration Control of a Semi-Active Vehicle Suspension System", *Appl. Sci.* 7(10), 1053, 2017; <https://doi.org/10.3390/app7101053>
62. Shiping Wen; Michael Z. Q. Chen; Zhigang Zeng; Tingwen Huang; Chaojie Li. Adaptive Neural-Fuzzy Sliding-Mode Fault-Tolerant Control for Uncertain Nonlinear Systems” IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics: Systems, Vol. PP, Issue: 99, pp.1-11, 2017, DOI: 10.1109/TSMC.2017.2648826
63. Xiaona Song; Shuai Song. Fuzzy sliding mode control for fractional-order unified chaotic system” 2016 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA), pp. 1090-1095, 2016, DOI: 10.1109/ICInfA.2016.7831981
64. Nigam, S. Hussain; S. N. Agarwal. A hybrid fuzzy sliding mode controller for a BLDC motor drive” 2016 IEEE 1st International Conference on Power Electronics, Intelligent Control and Energy Systems (ICPEICES).2016. P.1-4. doi: 10.1109/ICPEICES.2016.7853249
65. Hami Hagrass, "Type-2 FLCs: A New Generation of Fuzzy Controllers," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol.2, is.1, pp.30-43, 2007
66. Hong Mo, F.-Y. Wang, Min Zhou, Runmei Li, Zhiquan Xiao, “Footprint of uncertainty for type-2 fuzzy sets,” *Information Sciences*, vol. 272, pp.96-110, 2014
67. Maowen Nie, Woei Wan Tan “Interpreting the footprint of uncertainty for an interval-valued fuzzy set,” 2015 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), pp.1-8, 2015
68. Shyi-Ming Chen, Yu-Chuan Chang “Fuzzy Interpolative Reasoning Based on the Footprints of Uncertainty of Interval Type-2 Fuzzy Sets,” 2010 International Conference on Computational Aspects of Social Networks, pp. 569-572, 2010
69. Sarah Greenfield, Francisco Chiclana, Scott Dick, "Join and meet operations for interval-valued complex fuzzy logic," 2016 Annual Conference of the North American Fuzzy Information Processing Society (NAFIPS), pp.1-5, 2016
70. Simon Coupland, Robert John Robert John "Geometric logical operations for type-2 fuzzy sets," *Proceedings of IPMU'08*, pp.1274–1281, 2008
71. Claudia I. Gonzalez, Patricia Melin, Juan R. Castro, Oscar Castillo, "Edge Detection Methods Based on Generalized Type-2 Fuzzy Logic," Springer International Publishing, 2017, p.89

72. Jerry M. Mendel, "Uncertain Rule-Based Fuzzy Systems," Introduction and New Directions, 2nd Edition: Springer International Publishing, 2017, p.684
73. Jerry M. Mendel, "Type-2 fuzzy sets and systems: an overview," IEEE Comput. Intell. Mag. 2(1), pp.20–29, 2007
74. Jerry M. Mendel, Robert I. Bob John, "Type-2 Fuzzy Sets Made Simple," IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 10, no. 2, pp.117-127, 2002
75. Jerry M. Mendel, Wu, H., "New results about the centroid of an interval type-2 fuzzy set, including the centroid of a fuzzy granule," Inf. Sci. 177(2), pp. 360–377, 2007
76. Jerry M. Mendel, "On centroid calculations for type-2 fuzzy set," Appl. Comput. Math. 10(1), pp. 88–96, 2011
77. Castillo O., Melin P. Type-2 fuzzy logic theory and applications' Springer, 2008. — 237 p.
78. Mendel J. et al. Introduction to Type-2 Fuzzy Logic Control: Theory and Applications' Wiley, 2014. — 376 p.
79. Z.Ibrahim, E.Levi, An Experimental Investigation of Fuzzy Logic Speed Control in Permanent Magnet Synchronous Motor Drives' EPE Journal European Power Electronics and Drives, vol. 12, 2002, pp.37 – 42
80. Jong-Yul Kim, Hak-Man Kim, Seul-Ki Kim, Jin-Hong Jeon and Heung-Kwan Choi, "Designing an Energy Storage System Fuzzy PID Controller for Microgrid Islanded Operation" *Energies* 4(9), 1443-1460, 2011; <https://doi.org/10.3390/en4091443>
81. Liqiang Jin, Ronglin Zhang, Binghao Tang and Hao Guo, "A Fuzzy-PID Scheme for Low Speed Control of a Vehicle While Going on a Downhill Road", *Energies* 13(11), 2795, 2020; <https://doi.org/10.3390/en13112795>
82. Ishibuchi, T. Murata. A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part C: Applications and Review*; 1998; 28(3):392-403.

Дойников А. И.¹, Кадыров А. А.², Галиев Р. Д.¹, Иванов М. В.¹

¹ФГБОУ ВО «УУНиТ»

²АО «УППО»

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ АВТОНОМНОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ¹

Аннотация: Рассмотрены устройство и принцип работы датчика вибрации. Проанализированы возможности применения датчика вибрации. Изучена конструкция датчика вибрации. Собран и протестирован экспериментальный макет разрабатываемого автономного датчика вибрации.

Ключевые слова: датчик вибрации, сигнализация, удар, схема, электрическая схема, выпрямитель, механические вибрации.

I. ВВЕДЕНИЕ

В данной статье разрабатывается датчик вибрации со встроенной звуковой сигнализацией. Чувствительный элемент вибрации выступает в качестве простой системы охраны для защиты дверей, окон или камер

¹Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий из бюджета Республики Башкортостан аспирантам и молодым ученым, тема АП-ЭМ-02-21-ГБ.

хранения. При обнаружении небольшой вибрации датчик издает звуковой сигнал и зажигает светодиод. Датчик компактен, работает автономно от батареи и может быть помещен в корпус.

Рассмотрим существующие устройства, схожие по характеристикам и доступные в продаже:

1. Датчик Navigator 93 271 NSH-SNR-04

Мгновенно оповестит о возникновении вибрации в месте крепления, например, разбитии стекла или открытии крышки ноутбука.

- Звуковое и PUSH-оповещение при обнаружении вибрации;
- Работа от батареек 2хAAA индикация уровня заряда;
- IP20 – для использования внутри помещений.

Цена - 1 820 руб.

Датчик Navigator 93 271 NSH-SNR-04 показан на рисунке 1.



Рис. 1. Датчик Navigator 93 271 NSH-SNR-04

2. Aqara Vibration Sensor

Беспроводной датчик, представленный на рисунке 2, предназначен для охраны окна, сейфа, ящика с ценным документами. В случае инцидента, датчик отправит сообщение на смартфон или включит звуковую сирену на Aqara Hub.

- Габариты: 36*36*9 мм.;
- Протокол беспроводной передачи данных: Zigbee;
- Температура эксплуатации: -10°C – 50°C.

Цена - 1 490 руб.



Рис. 2. Aqara Vibration Sensor

3. Датчик вибрации iFEEL IFS-SV001

Датчик вибрации iFEEL IFS-SV001 способен отслеживать вибрации вблизи его установки. Маленький размер датчика делает его практически незаметным. У датчика предусмотрена настройка уровня чувствительности, в зависимости от того, где он будет установлен. Такими местами могут быть окна, ящики стола или сейф с ценностями. Датчик вибрации iFEEL IFS-SV001 показан на рисунке 3.

- Принцип работы: вибрационный;
- Тип зоны обнаружения: поверхностные;
- Способ монтажа: на поверхность;
- Количество блоков: одноблочный;
- Рабочее напряжение (макс): 3 В;
- Высота: 25 мм;
- Ширина: 41 мм.

Цена – 2221 руб.



Рис. 3. Датчик вибрации iFEEL IFS-SV001

Обзор существующих датчиков вибрации показал, что в продаже имеется ряд датчиков стоимостью до 2500 рублей, обеспечивающих передачу данных о

возникновении вибрации в специальное приложение на мобильном телефоне. Однако, найденные датчики производятся за пределами Российской Федерации. В связи с этим актуальна разработка отечественного датчика вибрации.

II. УСТРОЙСТВО И ПРИНЦИП РАБОТЫ РАЗРАБАТЫВАЕМОГО ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ

В принципиальной схеме разрабатываемого датчика вибрации используется небольшой сенсор вибрации. Он имеет два электрических контакта, которые не касаются друг друга в состоянии покоя. При любом ударе или вибрации контакты датчика соприкасаются, что приводит к замыканию электрической цепи. Сенсор вибрации показан на рисунке 4.



Рис. 4. Сенсор вибрации [4]

Сенсор вибрации не имеет полярности. Вывод большего диаметра подключен к V_{cc} через резистор, а тонкий контакт подключен к цепи, которая должна быть запущена.

Замкнутые контакты приводят в действие цепь, подключенную к нему. Схема датчика вибрации показана на рисунке 5.

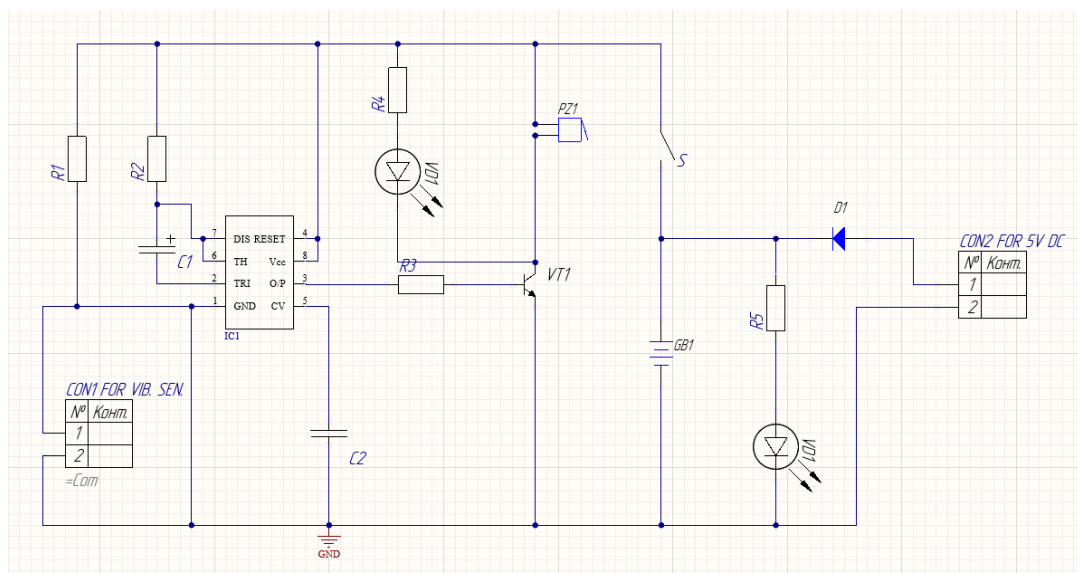


Рис. 5. Схема датчика вибрации

Он основан на таймере, N-P-N транзисторе КТ3102АМ и пьезо-зуммере.

Принцип работы датчика следующий. Таймер настроен в моностабильном режиме для включения зуммера и белого светодиода в течение примерно двух минут, когда датчик обнаруживает вибрацию. Датчик вибрации напрямую подключен между контактом запуска и контактом заземления таймера.

Сенсор смещен резистором R1, который так же поддерживает триггерный выход в высоком состоянии в режиме ожидания. При обнаружении сенсором небольшой вибрации, его контакты замыкаются и переводят выход таймера на уровень земли. Это запускает таймер и на его контакте повышается уровень сигнала примерно на 2 минуты в зависимости от значений компонентов синхронизации R2 и C1. Транзистор VT1 проводит питание на белый светодиод VD1 и зуммер, когда уровень сигнала становится высоким.

Схема питается от 4,5 вольтовой аккумуляторной батареи, которую можно заряжать с помощью зарядного устройства от мобильного телефона. О зарядке свидетельствует красный светодиод VD2.

III. ЭЛЕМЕНТЫ ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ

Элементами датчика вибрации являются:

1. Универсальный таймер. Является стабильным контроллером, способным задавать точные временные задержки и частоты [3];
2. Биполярный транзистор. Транзистор n-p-n кремниевый эпитаксиально-планарный в пластмассовом корпусе предназначен для использования в низкочастотных устройствах аппаратуры широкого применения [7];
3. Зуммер с генератором. Устройство, предназначенное для формирования и выдачи определенных звуковых сигналов;
4. Конденсатор электролитический алюминиевый;
5. Конденсатор керамический дисковый 0,1 мкФ;
6. Диод выпрямительный;
7. Светодиод белый;
8. Светодиод красный;
9. Выключатель;
10. Резистор углеродистый 0.5 Вт (2 шт.);
11. Резистор углеродистый 0,25 Вт (3 шт.);
12. Вилка на плату прямая двухконтактная;
13. Розетка на плату прямая двухконтактная;
14. Аккумулятор универсальный Li-ion;
17. Сенсор вибрации.

IV. ПРИМЕНЕНИЕ

К отличительным особенностям использования датчика вибрации можно отнести:

- (1) Принцип установки. Датчик вибрации может быть установлен стационарно или временно;
- (2) Сфера использования. Высокие показатели надежности позволяют применять данный прибор в различных сферах, в том числе в офисных помещениях и дома;

(3) Технические характеристики. Простая конструкция, понятный принцип работы, чувствительность;

(4) Возможность установки чувствительного элемента на расстоянии от самой платы. Вибрационный чувствительный элемент может быть установлен в необходимом месте, а сам корпус с излучателем может находиться в скрытом или удобном для пользователя месте [2].

Так как ключевая функция охранных извещателей на основе вибрационных датчиков, это обнаружение преднамеренного разрушительного воздействия на охраняемые конструкции, то применяются они для объектов с повышенной вероятностью попыток проникновения [4].

При выборе поверхностей конструкций для зональной блокировки, приоритет стоит отдавать тем участкам, которые потенциально предпочтительны злоумышленниками для проникновения (двери, окна, заборы, ворота, сейфы, перекрытия зданий и других сооружений, предположительно предпочтительных для проникновения путем разрушения).

Применимо разрабатываемое изделие и для контроля объектов, потенциально подвергающихся вандализму (витрины, окна, банкоматы, телефонные шкафы и так далее) [6].

Монтировать вибрационный извещатель следует с внутренней стороны охраняемого периметра [5]. Стоит тщательно выбрать место монтажа, в котором риск случайных механических повреждений будет минимальным.

Для снижения риска саботажа необходимо стремиться к монтажу извещателя таким образом, чтобы минимизировать возможность доступа третьих лиц.

V. ИСПЫТАНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОГО МАКЕТА ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ

Было проведено испытание экспериментального образца разрабатываемого датчика вибрации, изображенного на рисунке 6.

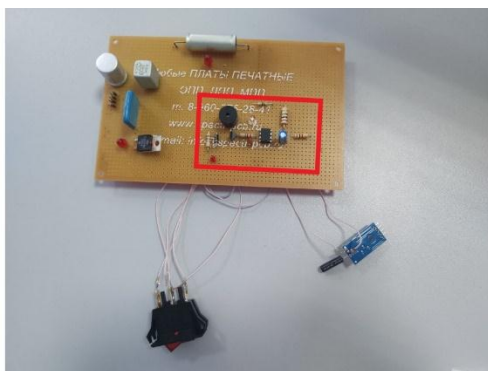


Рис. 6. Экспериментальный образец

Красным выделена область, которую занимают элементы датчика удара на макетной плате.

Далее, образец был подключен к питанию 5 В и была исследована работоспособность схемы. Эксперимент изображен на рисунке 7.

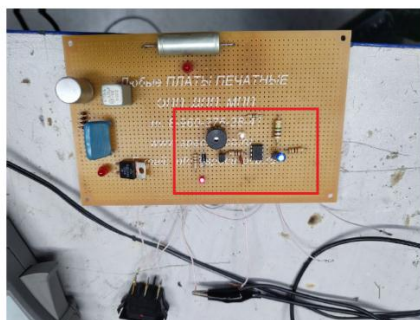


Рис. 7. Испытания макета

Как можно заметить, красный светодиод сигнализирует о получении питания схемой, а белый светодиод – о замыкании контактов на сенсоре вибрации. Схема издает громкий сигнал высокой частоты.

Так же было исследовано потребление тока в режиме ожидания. Величина тока потребления составила 4мА. Исследование представлено на рисунке 8.

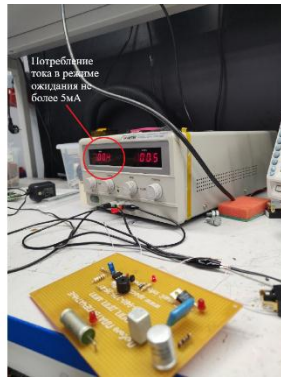


Рис. 8. Исследование потребления тока макетом в режиме ожидания

VI. ЭКОНОМИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ РАЗРАБОТКИ ДАТЧИКА ВИБРАЦИИ

Расчет стоимости по компонентам датчика.

Стоимость компонентов:

1. Универсальный таймер – 240 руб.;
2. Биполярный транзистор – 20 руб.;
3. Зуммер с генератором – 28 руб.;
4. Конденсатор электролитический алюминиевый – 7 руб.;
5. Конденсатор керамический дисковый – 8 руб.;
6. Диод выпрямительный – 5 руб.;
7. Светодиод белый – 22 руб.;
8. Светодиод красный – 10 руб.;
9. Выключатель – 70 руб.;
10. Резистор углеродистый 0.5 Вт (2 шт.) – 14 руб.;
11. Резистор углеродистый 0.25 Вт (3 шт.) – 5 руб.;
12. Вилка на плату прямая двухконтактная – 7 руб.;
15. Розетка на плату прямая двухконтактная – 7 руб.;
16. Аккумулятор универсальный – 330руб.;
17. Сенсор вибрации – 160руб.;
18. Печатная плата – 200 руб.;
19. Корпус – 150 руб.;

Цены указаны при штучной закупке. При закупке крупными партиями цена на каждый компонент может быть снижена на величину до 30%. Итоговая стоимость датчика при штучном производстве – 1300 рублей. Таким образом, цена разрабатываемого датчика дыма меньше, чем у импортных аналогов.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Итак, схема отличается простотой конструкции и сборки. Отсутствие подвижных частей добавляет системе надежности. Компактность схемы расширяет возможные варианты применения датчика вибрации. На сегодняшний день в рамках разработки датчика вибрации проведена трассировка печатной платы с выводными элементами, разработаны места крепления платы к корпусу. На рис. 9 приведена трехмерная модель печатной платы датчика вибрации.

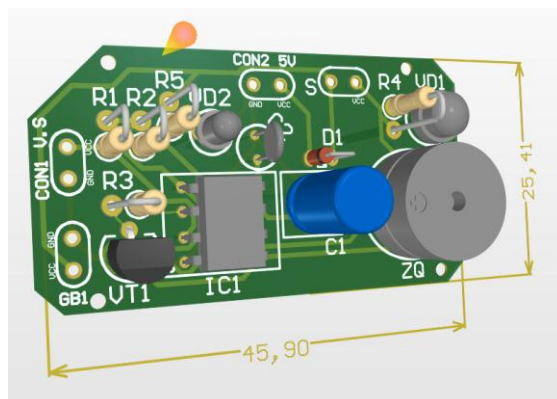


Рис. 9. Трехмерная модель печатной платы датчика вибрации

Дальнейшее развитие проекта будет направлено на создание эргономичного корпуса, обладающего герметичностью и устойчивостью к воздействию бытовых факторов. Также будет прорабатываться замена выводных радиоэлементов на радиоэлементы поверхностного монтажа, что при серийном производстве датчика позволит сократить время изготовления печатного узла и снизить стоимость производства.

Приблизительная итоговая стоимость датчика составляет 1300 рублей при штучном производстве и 910 рублей – ожидаемая стоимость при серийном

производстве. По сравнению с имеющимися аналогами, цена значительно ниже.

Разрабатываемый датчик вибрации является автономным, поэтому получить информацию с него может только человек, находящийся вблизи от датчика при его срабатывании. Перспективой разрабатываемого датчика вибрации является интеграция модуля связи, за счет которого датчик сможет передавать информацию в специализированное приложение на мобильном телефоне. В таком случае разрабатываемый датчик вибрации станет одним из важных компонентов системы «умный дом», направленной на обеспечение комфорта и безопасности людей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Изобретения и самоделки. Датчик вибрации своими руками. [Электронный ресурс]. Режим доступа: izobreteniya.net/datchik-vibraczii-svoimi-rukami (дата обращения: 03.11.2022)
2. Про датчик. Виды и принцип работы вибрационных датчиков, монтаж и применение. [Электронный ресурс]. Режим доступа: prodatchik.ru/vidy/datchik-vibracionnyj (дата обращения: 21.09.2022)
3. oSensorax. Изучаем датчики вибрации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: osensorax.ru/dvizhenie/datchik-vibratsii (дата обращения: 21.09.2022)
4. Chipdip. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.chipdip.ru (дата обращения: 21.09.2022)
5. Ассоциация ЕАМ. Измерение параметров вибрации. [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://eam.su/lekcija-12-izmerenie-parametrov-vibracii.html> (дата обращения: 21.09.2022)
6. Renesas Electronics Corporation. [Электронный ресурс]. Режим доступа: www.renesas.com/eu/en (дата обращения: 21.09.2022)

Едигарев А. Д., Люцков В. А., Сайпушев Б. А., Тетерин Р. О., Шемет М. В., Штыхин А. О.

АО «ОДК-Климов»

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ДВИГАТЕЛЬ ДЛЯ ПРИВОДА ДВИЖИТЕЛЯ ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА В СОСТАВЕ ДЕМОНСТРАТОРА ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ АО «ОДК» (АО «ОДК-КЛИМОВ»)

Аннотация: В данной статье представлено описание создаваемой АО «ОДК» (АО «ОДК-Климов») гибридной силовой установки, рассмотрены обрабатываемые конфигурации элементов: электрическая, турбоэлектрическая и гибридная. Также представлены конструктивные особенности, результаты проведенных расчетов и основные характеристики электрического двигателя и обеспечивающих его работу элементов силовой установки – аккумуляторной батареи, блоков силовой электроники и системы автоматического управления. Проведена оценка КПД силовой установки при работе от аккумуляторной батареи во время предварительных испытаний.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, электрическая силовая установка, предварительные испытания.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время наблюдается тенденция к повышению электрификации летательных аппаратов (ЛА). По данным [1] с середины 2000-х гг. наблюдается стремительный рост количества проектов по созданию гибридных и электрических силовых установок, а потребление электрической энергии на вновь разрабатываемых гражданских и военных ЛА с 2000 г. возросло в 2,5-4 раза.

На сегодняшний день развитие мировой авиации в направлении электрификации силовых установок коррелирует с автомобильной отраслью с некоторым запозданием в силу особенностей сертификации [2]. В силу значительно большей энергетики и нерешенной на данный момент задачи рекуперации внедрение электрических силовых установок (ЭСУ) в авиации может значительно затянуться, однако уже сегодня имеются положительные примеры применения ЭСУ как на самолетах, так и на вертолетах. Так самолет Alice компании Eviation Aircraft в сентябре 2022 г. впервые совершил свой первый полет продолжительностью 8 минут [3], а в октябре 2022 г. свой первый перелет из аэропорта в аэропорт, длившийся 20 минут, совершил

электрический вертолет Robinson R44, ремоторизацию которого осуществила компания Tier 1 Engineering [4]. Описанные выше ЛА оснащены ЭСУ на базе двигательных установок компании MagniX, которые проходят сертификационные процедуры по нормам FAA.

Пионером в области сертификации ЛА с ЭСУ стала словенская компания Pipistrel, которая получила сертификат типа EASA на двухместный самолет Velis Electro в июне 2020 г. [5].

Данные примеры наглядно демонстрируют направление развития авиации, и в дальнейшем, с развитием химических источников тока, перечень ЛА с гибридными (ГСУ) и электрическими силовыми установками будет пополняться самолетами, вертолетами и ЛА мультикоптерного типа с все большей взлетной массой и полезной нагрузкой.

Применение ГСУ и ЭСУ позволяет значительно повысить экологичность полетов – выбросы вредных веществ при работе ГСУ в районе аэропорта сокращаются до 50%, а при работе ЭСУ равны нулю. Также одним из неоспоримых преимуществ данных силовых установок является возможность создания новых архитектур ЛА с распределенными движителями.

Отечественные разработчики авиационной техники также проводят исследования в направлении электрификации. Так, в рамках научно-исследовательской работы (НИР), выполняемой АО «ОДК» (АО «ОДК-Климов») осуществляется разработка демонстратора ГСУ, который позволит отработать различные конфигурации элементов.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

A. *Описание ГСУ АО «ОДК» (АО «ОДК-Климов»)*

ГСУ в наиболее общем случае разделяются на две основные схемы: последовательную и параллельную. Также существуют последовательно-параллельная, турбоэлектрическая и прочие варианты схем ГСУ, которые являются комбинацией или упрощением основных схем.

В последовательной схеме (рис. 1) привод движителей осуществляется исключительно за счет электродвигателя (ЭД). Тепловая машина в данном случае приводит во вращение электрогенератор (ЭГ), который генерирует электроэнергию. В качестве тепловой машины в авиации чаще всего используют авиационный поршневой двигатель либо газотурбинный двигатель. Комбинацию тепловой машины и ЭГ называют энергоузлом. Проходя через преобразователи, электроэнергия направляется в ЭД, где преобразуется в механическую энергию вращения выводного вала. Также возможен вариант отбора мощности на заряд аккумуляторной батареи (АКБ). Кроме того, питание ЭД возможно за счет АКБ либо за счет совокупной электрической энергии от АКБ и энергоузла, то есть в последовательной схеме реализуется «электрическое» суммирование мощности. [6]



Рис. 1. Структурная схема последовательной ГСУ

В параллельной схеме (рис. 2) привод движителей может осуществляться как от ЭД, питаемого АКБ, или тепловой машины, так и за счет их совместной работы. Таким образом в параллельной схеме реализуется «механическое» суммирование мощности.

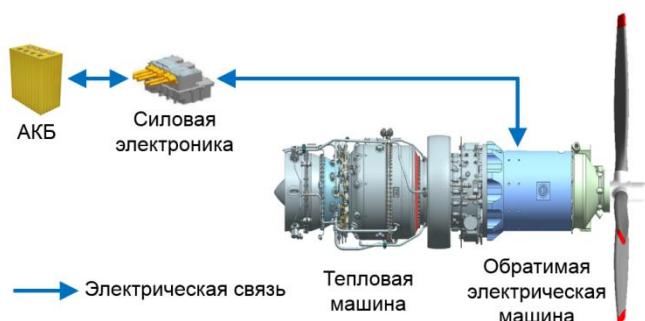


Рис. 2. Структурная схема параллельной ГСУ

Демонстратор ГСУ, разрабатываемый АО «ОДК» (АО «ОДК-Климов») представляет собой последовательную ГСУ. Структурная схема демонстратора представлена на рис. 3.

Разрабатываемый демонстратор позволяет отработать гибридный, электрический и турбоэлектрический режимы работы, для этого необходимо выбрать соответствующую конфигурацию элементов силовой установки в автоматизированной системе управления технологическим процессом испытаний (АСУТП-И), вводя и исключая при этом необходимые источники и потребители энергии.

Далее более подробно рассмотрены элементы, составляющие электрическую конфигурацию ГСУ.

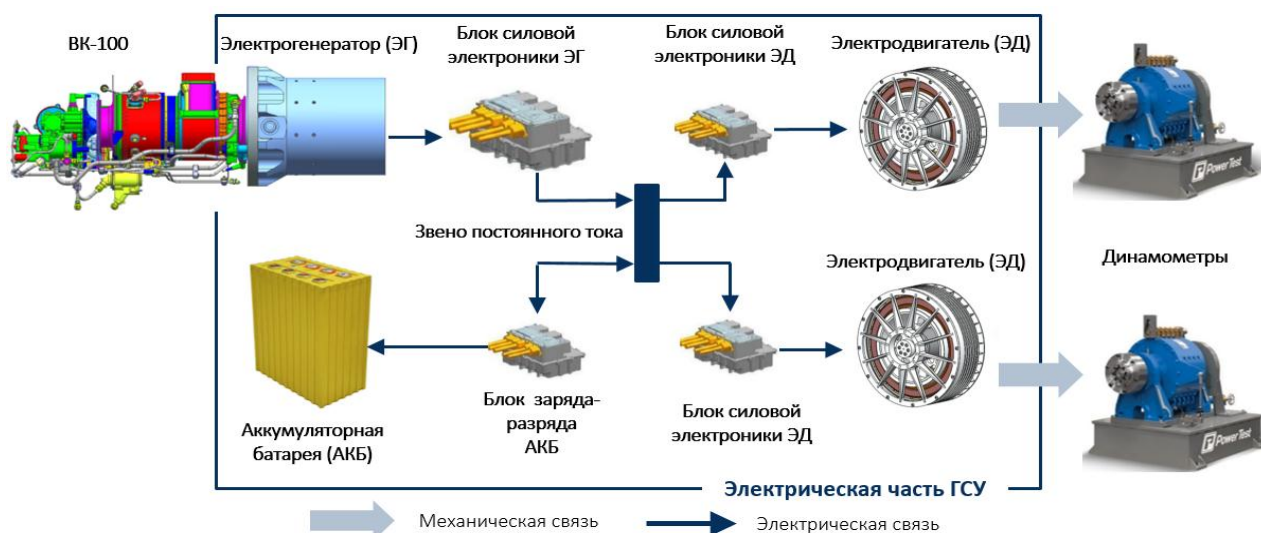


Рис. 3. Структурная схема демонстратора ГСУ

В. Электродвигатель

Электродвигатель (ЭД) представляет собой синхронную электрическую машину на постоянных магнитах с внутренним ротором.

В процессе разработки ЭД были проведены итерационные электромагнитные, тепловые и прочностные расчеты на требуемых режимах. Также проведен расчет критических частот ротора.

Результаты расчетных исследований показали, что максимальная температура обмоток на номинальном режиме не превышает 160°C (рис. 4), температура ротора не превышает 100°C (рис. 5), запасы прочности по деталям статора и ротора превышают 1,7 и 1,4 соответственно (рис. 6 и 7). Запас по критическим частотам вращения «сверху» составил более 30% - ротор «докритический».

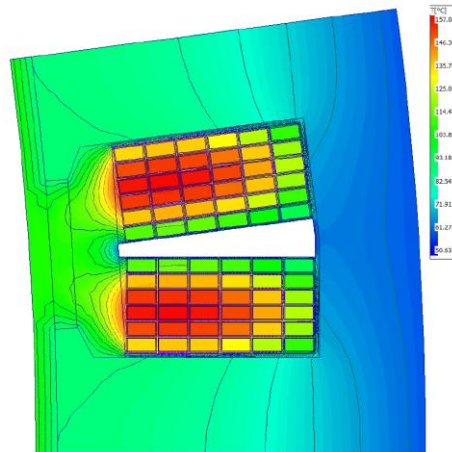


Рис. 4. Результаты теплового расчета статора ЭД

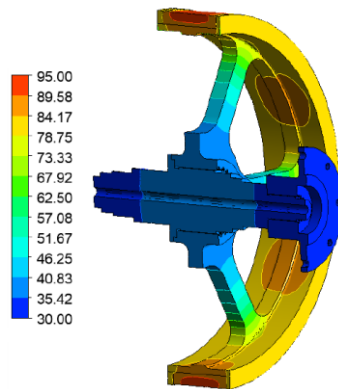


Рис. 5. Результаты теплового расчета ротора ЭД

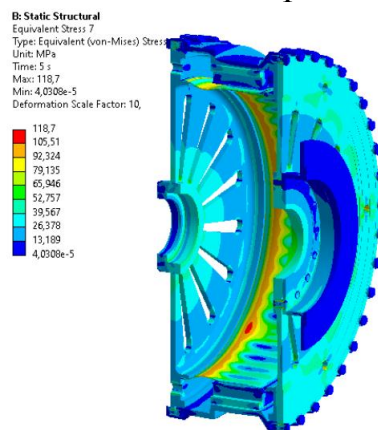


Рис. 6. Результаты расчета прочности статорных деталей ЭД

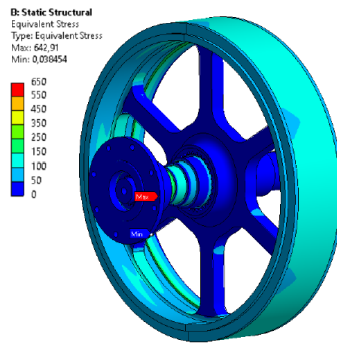


Рис. 7. Результаты расчета прочности роторных деталей ЭД

Результаты расчетных исследований подтверждают теоретическую работоспособность конструкции и правильность принятых в процессе разработки решений.

Основные параметры ЭД представлены в таблице 1.

Таблица 1

Основные параметры ЭД

Параметр	Значение
Номинальная мощность, кВт	250
Пиковая мощность в течение 5 мин, кВт	500
Номинальная частота вращения, об/мин	2000
Удельная мощность, кВт/кг	6,7
КПД, -	0,96

Общий вид ЭД представлен на рис. 8.



Рис. 8. Общий вид ЭД

С. Аккумуляторная батарея

АКБ имеет модульную структуру и собрана на основе литий-ионных аккумуляторных ячеек.

В процессе разработки проведены проектировочные и поверочные расчеты. Результат расчета теплового состояния ячеек представлен на рис. 9.

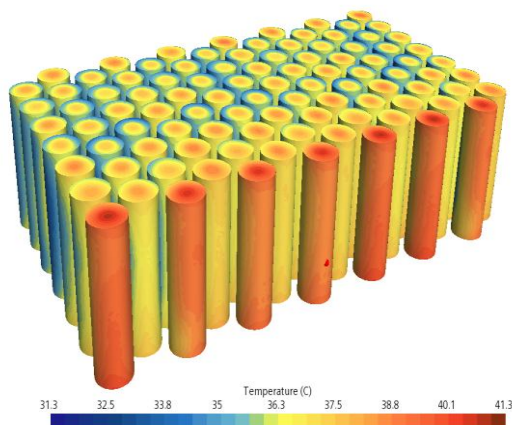


Рис. 9. Результаты расчета теплового состояния ячеек АКБ

Основные параметры АКБ представлены в таблице 2.

Таблица 2

Основные параметры АКБ

Параметр	Значение
Длительная мощность разряда, кВт	120
Пиковая мощность разряда в течение 5 мин, кВт	150
Длительная мощность заряда, кВт	20
Емкость, кВт·ч	27,2
Удельная энергоемкость ячеек, Вт·ч/кг	216

Общий вид стендового исполнения одного модуля и АКБ в целом представлены на рис. 10.

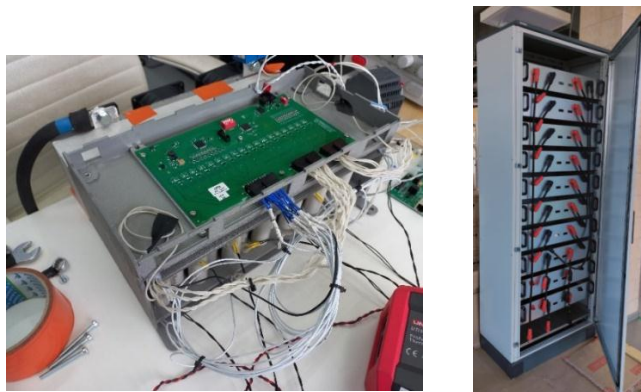


Рис. 10. Общий вид стендового исполнения модуля и АКБ в целом

D. Блок силовой электроники двигателя и блок заряда-разряда АКБ

Блок силовой электроники двигателя (БСЭД) представляет собой шестифазный инвертор мостовой схемы на основе карбид-кремниевых силовых транзисторных модулей с частотой коммутации 12кГц. БСЭД предназначен для векторного управления ЭД.

БСЭД имеет собственную систему контроля, которая обеспечивает векторное управление ЭД и передает данные о состоянии ЭД и БСЭД в систему автоматического управления верхнего уровня (САУ ГСУ).

Блок заряда-разряда АКБ (БЗР) представляет собой многоканальный повышающий преобразователь для согласования напряжений АКБ и звена постоянного тока. БЗР обеспечивает двунаправленный обмен электрической энергией для обеспечения разряда и заряда АКБ в составе ГСУ.

БЗР также имеет собственную систему управления, осуществляющую управление многоканальным преобразователем и передачу данных в САУ ГСУ.

Основные параметры БСЭД и БЗР представлены в таблице 3.

Таблица 3

Основные параметры БСЭД и БЗР

Параметр	Значение	
	БСЭД	БЗР
Номинальная мощность, кВт	250	150
Пиковая мощность в течение 5 мин, кВт	-	165
Удельная мощность, кВт/кг	18,5	3,2
КПД, -	0,95	0,98

Общий вид БСЭД и БЗР представлен на рис. 11 и 12 соответственно.



Рис. 11. Общий вид БСЭД

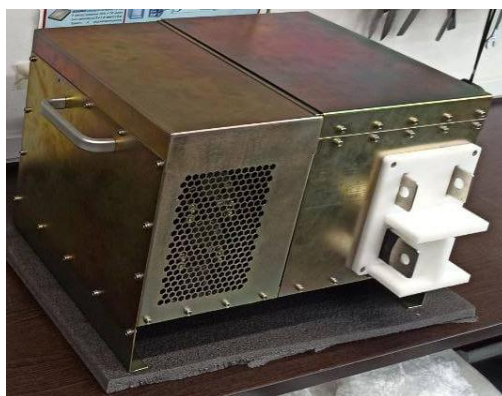


Рис. 12. Общий вид БЗР

Е. Система автоматического управления ГСУ

САУ ГСУ представляет собой распределенную систему, передача информации осуществляется через общую информационную CAN-шину по стандарту ARINC 825.

САУ ГСУ обеспечивает управление, контроль и диагностику силовой установки, ее систем и элементов, формирование и выдачу информационных сигналов в информационно-диагностический комплекс (ИДК) и АСУТП-И стенда, а также прием и обработку команд от стенда через ИДК.

Ф. Отладка взаимодействия элементов ГСУ

Отладка взаимодействия элементов ГСУ и отработка стендовых систем проводилась на пониженных режимах работы. Нагрузка на ЭД ограничивалась 60 кВт, а время работы под нагрузкой – 1 минутой.

В процессе отладки подтверждена корректность принятых технических решений и обеспечена работа ГСУ в автоматическом режиме. В проведенной серии опытов при нагрузке ЭД на соответствующих режимах работы наблюдалась повторяемость значений, что говорит об устойчивой работе силовой установки.

САУ ГСУ обеспечила линейное увеличение частоты вращения ротора ЭД с заданным коэффициентом, поддержание частоты вращения ротора ЭД в процессе изменения и поддержания мощности с точностью $\pm 1\%$.

Стендовые датчики измерения электрических и механических параметров ГСУ позволили оценить КПД элементов и силовой установки в целом. Результаты представлены в таблице 4.

Таблица 4

Коэффициенты полезного действия

Параметр	Значение	
	Расчетное	Фактическое
БЗР	0,98	$0,98 \pm 0,02$
БСЭД + ЭД	0,91	$0,91 \pm 0,02$
БЗР + БСЭД + ЭД	0,89	$0,90 \pm 0,02$

При отладке силовой установки на пониженных уровнях мощности были отработаны:

1. взаимодействие элементов в основных режимах работы ГСУ;
2. алгоритмы автоматического управления и информационный обмен;
3. обеспечивающие стендовые системы.

III. ВЫВОДЫ

Мировой тренд увеличения количества проектов ЛА с ГСУ и ЭСУ говорит о необходимости развития данного направления в отечественной авиации.

Разработанные и изготовленные в рамках НИР по созданию демонстратора ГСУ элементы силовой установки имеют высокую эффективность и передовые удельные характеристики, соответствующие мировому уровню.

Проведенная отладка взаимодействия элементов ГСУ на пониженных режимах работы подтвердила правильность принятых технических решений и заявленную эффективность элементов силовой установки.

Дальнейшая работа в рамках создания ГСУ направлена на доработку основных элементов с целью повышения удельных характеристик и проведение испытаний на номинальном режиме работы ГСУ с суммарной механической мощностью на валах ЭД 500 кВт.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. R. Thomson, N. Sachdeva, M. Nazukin, N. Martinez, Aircraft Electrical Propulsion – The Next Chapter of Aviation?, London: Roland Berger GmbH, 2017, p. 32.
2. А.Д. Едигарев, К.Г. Масленников, В.В. Писарев, Б.А. Сайпушев, М.В. Шемет, А.П. Чуфистов. Анализ эффективности применения гибридных силовых установок на базе ТВаД АО «ОДК-Климов» в составе различных летательных аппаратов // Климовские чтения – 2022: перспективные направления развития авиадвигателестроения. – СПб.: Скифия-принт, 2022. – с. 234-245.
3. PRNewswire, Everett, WA. MagniX powers Eviation's all-electric Alice aircraft for historic first flight [Online]. Available: <https://www.prnewswire.com/news-releases/magnix-powers-eviations-all-electric-alice-aircraft-for-historic-first-flight-301635377.html>
4. K. Swartz. (2022, Nov.). “Tier 1 Engineering’s electric e-R44 makes historic airport-to-airport cross-country flight”, *Vertical*, MHM Publishing Inc., Fall River, WI. [Online]. Available: <https://issues.verticalmag.com/554/766/1745/V21I5-NOV/index.html>
5. R. Mark. (2020, June). “Pipistrel’s Velis Electro certified in Europe”, *Flying* [Online]. Available: <https://www.flyingmag.com/pipistrel-velis-electro-certified-in-europe/>
6. П.П. Власов, А.Д. Едигарев, И.В. Митюрин, Б.А. Сайпушев, И.А. Солуянов, М.В. Шемет. Автоматизированная математическая модель для рациональной конфигурации гибридной силовой установки в составе летательных аппаратов // Климовские чтения – 2021: перспективные направления развития авиадвигателестроения. – СПб.: Скифия-принт, 2021. – с. 129-139.

Михайлов А. Е., Еременко В. В., Михайлова А. Б., Горюхин М. О., Красноперов Д. Г., Подгузов А. А.
ФГБОУ ВО «УУНиТ»

ИССЛЕДОВАНИЕ РАБОЧЕГО ПРОЦЕССА ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ НА БАЗЕ УЛЬТРАМИКРОГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ¹

Аннотация: Проведен обзор работ в области создания ультрамикروгазотурбинных двигателей. Проведено концептуальное проектирование ультрамикрогазотурбинного двигателя. Построена математическая модель ГСУ в Matlab Simulink. На основе разработанной модели проведен расчет ряда переходных процессов и установившихся режимов работы ГСУ.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, малоразмерный газотурбинный двигатель, ультрамикрогазотурбинный двигатель.

I. ВВЕДЕНИЕ

Современное авиадвигателестроение приближается к максимально достижимым параметрам цикла и показателей совершенства основных узлов, их дальнейшее развитие связано в первую очередь с переходом к новым архитектурам и фундаментальным принципам работы.

Одним из перспективных трендов в авиационной отрасли является создание гибридных силовых установок (ГСУ). И хотя сама идея создания ГСУ возникла еще в начале XXI века, лишь в последнее время она получила широкое распространение [1-2].

В настоящее время ведется активное исследование эффективности применения ГСУ как на пассажирских самолетах различной пассажировместимости и дальности полета, так и на беспилотных летательных аппаратах (БПЛА). Применение ГСУ для БПЛА является более оправданным вследствие небольшой массы силовой установки [3-4].



Рис. 1. Классификация БПЛА

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

В техническом отчете NASA [5] описана концепция использования ГСУ в вертолетах и конвертопланах. Отмечены следующие преимущества: практически мгновенная реакция на управляющее воздействие, возможность уменьшения размеров проточной части двигателя, возможность использования распределенной системы движителей.

Так же основными преимуществами гибридной силовой установки являются сниженный уровень шума, меньшая видимость в инфракрасном диапазоне. На сегодняшний день известны следующие основные архитектуры ГСУ: распределенная силовая установка, ГСУ параллельной схемы, ГСУ последовательной схемы.

В работе [6] учеными из DLR рассмотрены различные конструкции ГСУ и приводятся данные о текущих и теоретических параметрах аккумуляторной батареи. Сделан вывод, что для внедрения ГСУ удельная емкость аккумуляторной батареи находится на уровне 800–1000 Втч/кг.

В работе [7] проведено исследование ГСУ в широком диапазоне мощности от 460 Вт до 4 МВт. Сделаны выводы о возможности снижения расхода топлива за счет использования ГСУ, при этом до 47% достигается для малых БПЛА и до 10% для самолетов средних размеров.

В последнее время в России проводится большое количество исследований в области создания ГСУ. В работе [8] ЦИАМ им. П.И. Баранова опубликованы результаты исследований различных концепций ГСУ, их преимущества и недостатки. В работе [9] содержится оценка эффективности региональных самолетов с гибридной силовой установкой.

Значительный объем исследований, посвященных ГСУ, позволяет сделать несколько выводов. Во-первых ожидается, что разрабатываемые ГСУ будут обладать повышенной топливной эффективностью при умеренном повышении массы. Во-вторых, предполагается, что подобные СУ будут достигать целевых значений по шуму, эмиссии вредных веществ.

Основными препятствиями на пути развития самолетов с ГСУ являются низкие удельные параметры аккумуляторной батареи и электрических

компонентов. Отмечается также необходимость разработки средств моделирования, позволяющих выполнять мультидисциплинарные исследования, в том числе газотурбинных двигателей, электрических компонентов и систем охлаждения в ходе выполнения полетных заданий.

II. ОБЗОР РАЗРАБОТОК МАЛОРАЗМЕРНЫХ ГИБРИДНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК

Созданием и разработкой действующих прототипов ГСУ для беспилотных аппаратов занималась исследовательская группа из KIMM (Korea Institute of Machinery & Materials), разработавшая рекуперативную силовую установку с номинальной мощностью 500 Вт при частоте вращения 400 000 об/мин [10-14]. УМГТД представляет собой кольцевую камеру сгорания, центробежный компрессор и центростремительную турбину, на валу которого устанавливается генератор. (Рис. 2). В ходе испытаний ультрамикродвигатель при 150 000 об/мин стабильно вырабатывал 5 Вт, при 200 000 об/мин – 30 Вт.

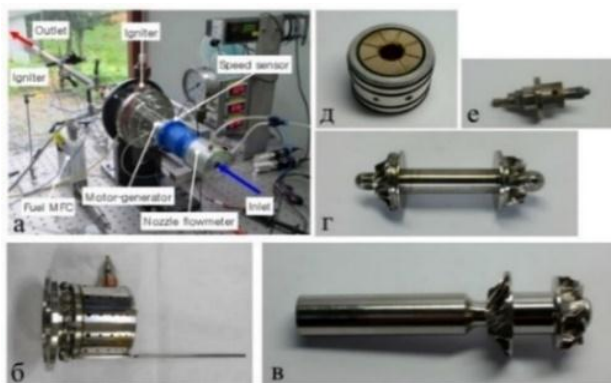


Рис. 2. ГСУ исследовательской группы из KIMM

Разработкой ГСУ занималась так же исследовательская группа из von Karman Institute for Fluid Dynamics (VKI) и Katholieke Universiteit Leuven. Они исследовали рекуперативную силовую установку (рис. 3) с консольным расположением генератора и составным ротором [15]. При частоте вращения 500 000 об/мин, степени повышения давления 3 и температуре газов за камерой

сгорания предполагалось достижение выходной мощности до 1000 Вт. Также в рамках эксперимента были проведены испытания отдельных узлов (компрессор и турбина), построены их характеристики [16].

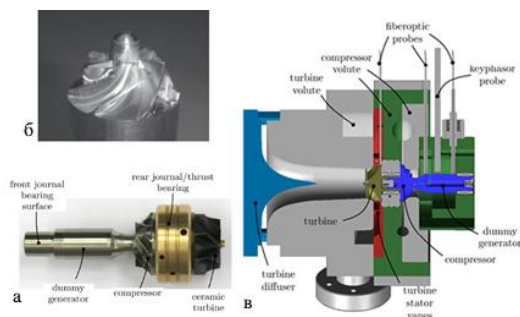


Рис. 3. ГСУ исследовательской группы из VKI

В 2007 году исследовательская группа из римского университета Le Sapienza представила результаты разработки и испытаний ГСУ с выходной мощностью 300 Вт [17-23]. Разработанный двигатель представлял собой соединение отдельных узлов турбины, компрессора, камеры сгорания с теплообменником, электродвигателя-генератора и блока управления (Рис 4). Номинальная частота вращения ротора составляла 150000–180000 об/мин. Испытания камеры сгорания показали работоспособность на различных режимах и высокий уровень характеристик. В будущем планируются проведение испытаний окончательной сборки ультрамикроразтурбинного двигателя.

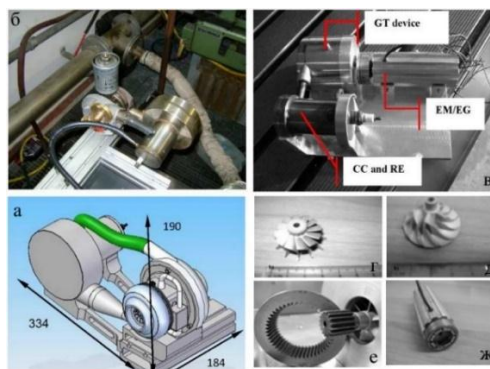


Рис. 4. ГСУ исследовательской группы из Le Sapienza

На сегодняшний день отсутствуют успешные проекты создания ультрамикродвигателей, однако, во многих научных центрах продолжают поисковые исследования по данной тематике.

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

A. Термогазодинамическая модель тепловой машины

Задача выбора параметров малоразмерного газотурбинного двигателя заключается в поиске оптимальных значений степени повышения давления в компрессоре и температуры газов за камерой сгорания при выбранных реалистичных значениях показателей совершенства узлов двигателя.

Для оценки реалистичного адиабатического КПД центробежного компрессора и центростремительной турбины было использовано программное обеспечение Ansys Vista CCD и RTD, необходимое для формирования геометрической конфигурации при заданных исходных параметрах. Ограничениями были выбраны: частота вращения ротора, мощность на генераторе – 1 кВт, степень повышения давления в одном центробежном компрессоре.

Проведенный термогазодинамический анализ показал, что для обеспечения требуемого удельного расхода топлива при номинальной мощности 1 кВт необходимо обеспечить в проектной точке степень повышения давления 2,25 и температуру газов за камерой сгорания 1180 К.

При заданных параметрах обеспечивается минимальный удельный расход топлива 1,9375 кг/кВт ч.

Таблица 1

Выбранные термогазодинамические параметры УМГТД

Параметры	Значения
1	2
Расход воздуха, кг/с	0,045
Степень повышения давления	2,25
Температура газов за камерой сгорания, К	1185,55
Внутренний диаметр КС, м	0,02
Внешний диаметр КС, м	0,06

1	2
Коэф. восстановления давления КС	0,93
Коэф. давления в ВУ	0,99
КПД горения	0,98
Потери на трение	0,99
Удельный расход топлива, кг/кВт ч	1,9375
Удельная мощность, кВт с/кг	22,2

Для построения математической модели были проведены CFD-расчеты лопаточных машин для получения напорных и КПД-характеристик. Заданные значения потери на трение на валу двигателя, коэффициента восстановления полного давления в камере сгорания, полноты сгорания топлива в камере сгорания были приняты постоянными.

В. Создание математической модели ГСУ

Для исследования рабочего процесса в гибридной силовой установке была создана математическая модель в MatLab Simulink. Математическая модель включает входной устройтво, компрессор, турбину, камеру сгорания и электрогенератор. Архитектура показана на рис. 5.

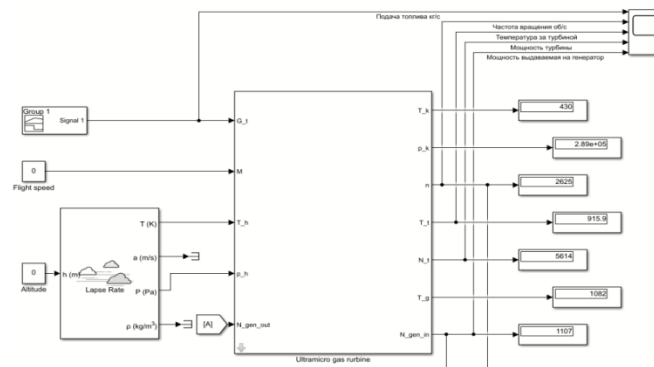


Рис. 5. Математическая модель УМГТД

При создании модели УМГД были приняты некоторые допущения, которые помогли упростить разрабатываемую модель:

1) В качестве рабочего тела принят идеальный газ, при этом показатель адиабаты и газовую постоянную воздуха на входе в компрессор и до камеры сгорания принимаем $k = 1,4$ и газовую постоянную $R = 287$ Дж/(кг · К).

2) Сжатие воздуха и расширение газа соответствует адиабатическому процессу.

3) Камера сгорания представлена как пневматическая цилиндрическая емкость с подводом тепла в виде сгорания топлива.

4) Учет зависимости c_p от T осуществлялся по энтальпии продуктов сгорания.

Для создания и описания каждого узла модели были использованы следующие уравнения [24].

1. Компрессор (рис. 6):

$$T_K^* = T_{ВХ}^* \left(1 + \frac{\pi_K^{*\frac{k-1}{k}} - 1}{\eta_K} \right)$$

$$N_K = G_B (i_K^* - i_{ВХ}^*) = G_B R \frac{k}{k-1} (T_K^* - T_{ВХ}^*)$$

где N_K – мощность компрессора, Вт, i_K^* – энтальпия воздуха на выходе из компрессора, Дж/кг, $i_{ВХ}^*$ – энтальпия воздуха на входе в компрессор, Дж/кг, η_K – изоэнтропический коэффициент полезного действия компрессора, МДж.

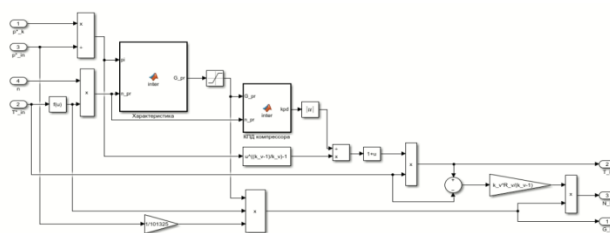


Рис. 6. Блок компрессор

2. Камера сгорания (рис. 7) [25, 26]:

Согласно уравнению нестационарного теплового баланса

$$c_{p,г} \frac{V_{кc} p_{г}^*}{R_{г} T_{г}^*} \frac{dT_{г}^*}{dt} = c_{p,в} G_B T_K^* + G_{кер} H_u \eta_{кc} - c_{p,г} G_{г} T_{г}^*$$

где $c_{p,г}$ – изобарная теплоемкость продуктов сгорания, Дж/кг · К, $V_{кc}$ – объем камеры сгорания, м³, $T_{г}^*$ – температура продуктов сгорания на выходе из камеры, К, $G_{кер}$ – расход керосина, подающегося в камеру сгорания, кг/с, H_u –

низшая теплота сгорания, МДж, $\eta_{\text{КС}}$ – коэффициент полезного действия горения, МДж, G_{Γ} – расход газа на выходе из камеры сгорания, кг/с.

Из уравнения неразрывности:

$$\frac{dp_{\Gamma}^*}{dt} = \frac{R_{\Gamma} T_{\Gamma}^*}{V_{\text{КС}}} (G_{\text{В}} + G_{\text{кер}} - G_{\Gamma}) + \frac{p_{\Gamma}^*}{T_{\Gamma}^*} \frac{dT_{\Gamma}^*}{dt}$$

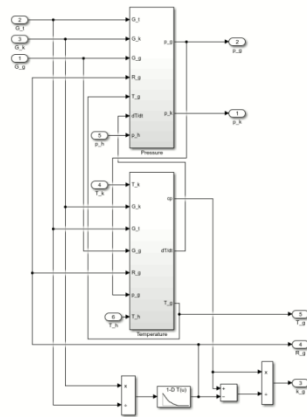


Рис. 7. Блок камеры сгорания

3. Турбина (рис. 8) [24-27]:

$$T_{\text{T}}^* = T_{\Gamma}^* \left(1 - \eta_{\text{T}} \left[1 - \left(\frac{1}{\pi_{\text{К}}} \right)^{\frac{k_{\Gamma}-1}{k_{\Gamma}}} \right] \right)$$

где T_{T}^* – температура газа за турбиной, К, η_{T} – изоэнтروпический коэффициент полезного действия турбины, МДж;

$$N_{\text{T}} = G_{\Gamma} (i_{\Gamma}^* - i_{\text{T}}^*) = G_{\Gamma} R_{\Gamma} \frac{k_{\Gamma}}{k_{\Gamma} - 1} (T_{\Gamma}^* - T_{\text{T}}^*)$$

где T_{T}^* – температура газа за турбиной, К, η_{T} – изоэнтропический коэффициент полезного действия турбины, МДж;

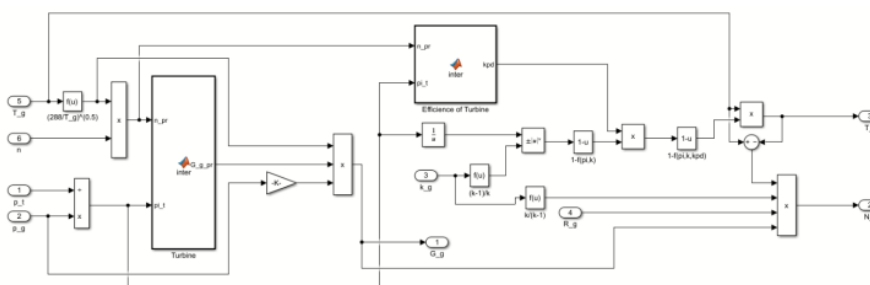


Рис. 8. Блок турбины

4. Механическая связь турбины и компрессора

(рис. 9) [25,27,28]:

$$\frac{dn}{dt} = \frac{N_T + N_{CT} - N_K - N_{TP}(n)}{(\pi/30)^2 I \cdot n}, N_{TP}(n) = k_{TP}(n) \cdot n,$$

где I – момент инерции ротора, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$, N_{CT} – мощность стартера, Вт, $N_{TP}(n)$ – мощность, затрачиваемая на трение, Вт, $k_{TP}(n)$ – коэффициент расчета потерь мощности на трение, Вт;

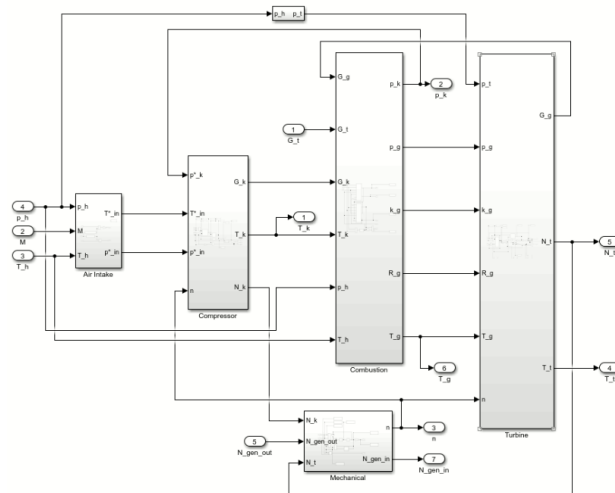


Рис. 9. Механическая связь компрессора и турбины

С. Создание математической модели электрического генератора

Электрический генератор (рис. 10) был выбран из модуля SimPowerSystems. Permanent Magnet Synchronous Machine является классической синхронной машиной с постоянными магнитами. В модели не учитывается насыщение магнитной цепи, поскольку такие машины имеют, как правило, повышенный воздушный зазор. Порты модели А, В и С являются выводами статорной обмотки машины. Входной порт T_m служит для задания момента сопротивления. На выходном потоке m формируется векторный сигнал, состоящий из 10 элементов.

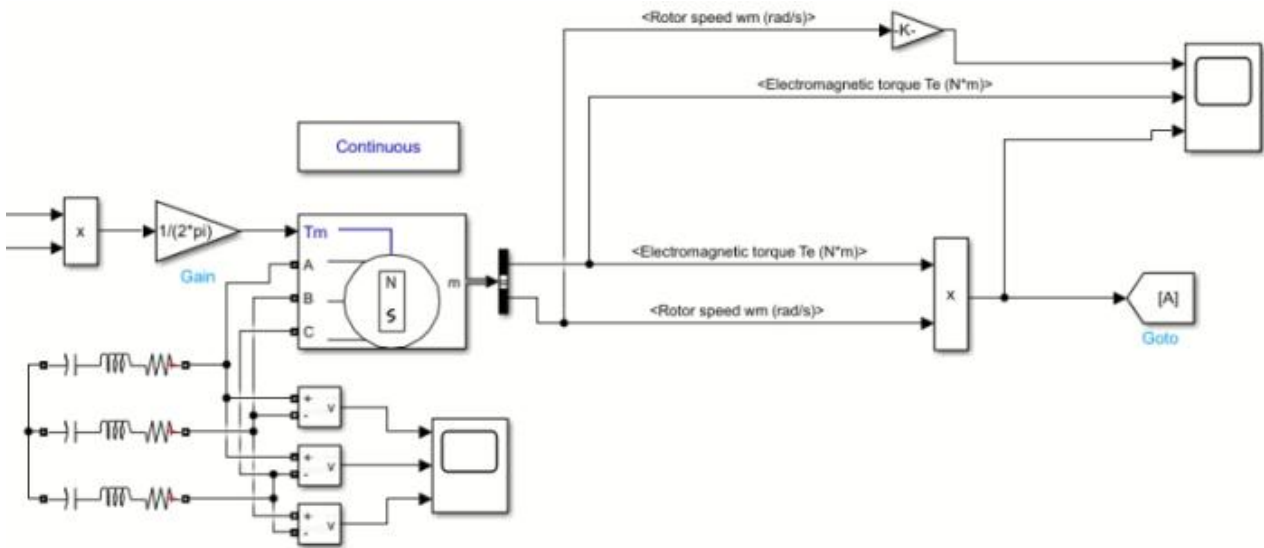


Рис. 10. Математическая модель электрического генератора

IV. РЕЗУЛЬТАТЫ

При тестировании разработанной модели был задан временной закон изменения подачи топлива в камеру сгорания. Изменение подачи топлива является управляющим фактором в УМГТД для изменения режима работы.

Подача топлива будет производиться с уменьшенного значения расхода топлива, после чего его значение увеличивается до проектного расхода (рис. 11).

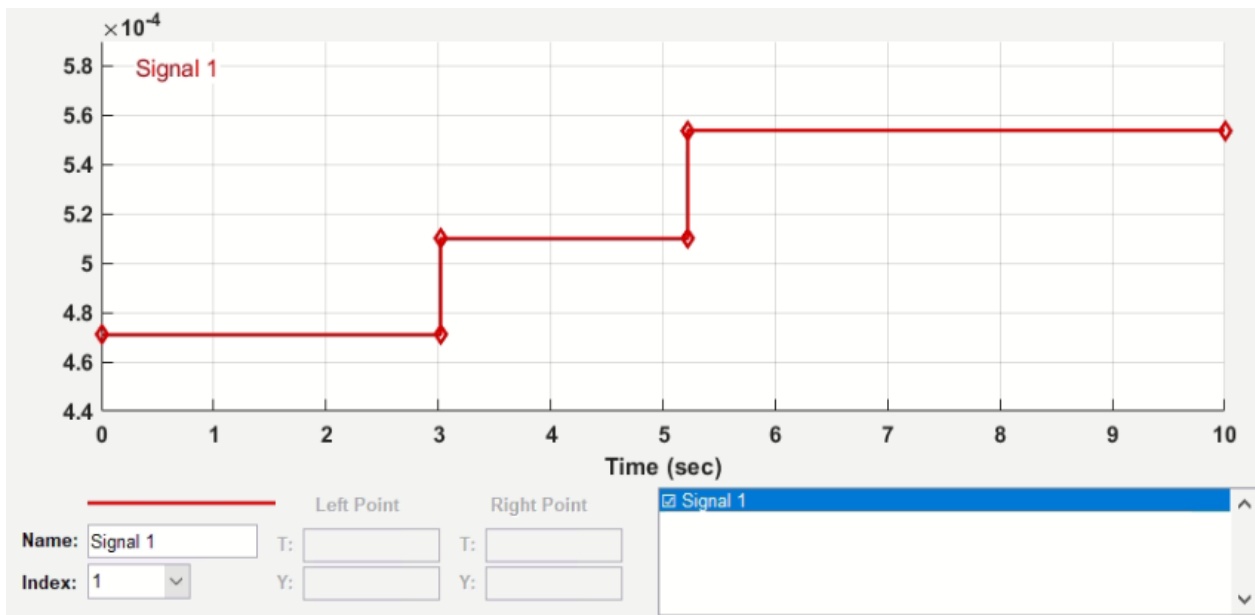
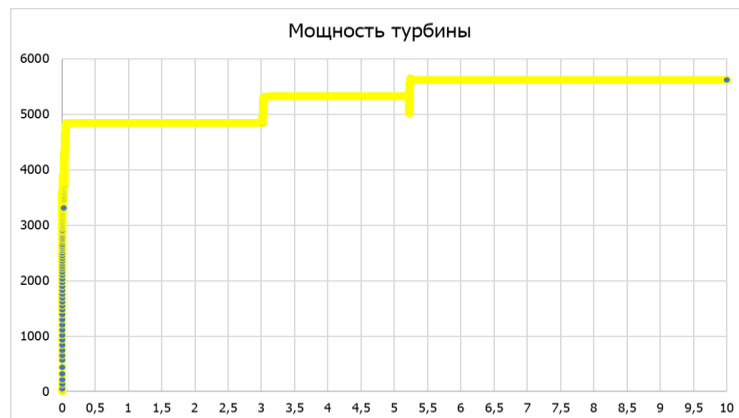


Рис. 11. Изменение подачи топлива в двигатель

В результате изменения подачи топлива параметры мощности на валу, температуры газов за турбиной и частоты вращения ротора изменяются следующим образом (рис. 12).



a



б



в

Рис. 12. Результаты моделирования:
a – частота вращения; *б* – мощность турбины; *в* – мощность электродвигателя

V. ВЫВОДЫ

В рамках данной работы были определены оптимальные параметры цикла ультрамикрoгазотурбинного двигателя. Построена математическая модель ГСУ на основе уравнений неразрывности и баланса мощности.

Проведены тестовые расчеты ГСУ на основе разработанной математической модели. Построены зависимости частоты вращения ротора, мощности турбины и мощности, выдаваемой генератором.

Определено, что заложенные характеристик обеспечивают номинальную мощность 1 кВт.

Дальнейшая работа состоит в уточнении модели электрического генератора, напорных и КПД характеристик компрессора и турбины, а так же модели камеры сгорания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Bradley M., Droney C. Subsonic ultra green aircraft research: phase I final report // NASA, Langley Research Center 2011. 207 p. NASA/CR–2011-216847. 330
2. Examining the conceptual design process for future hybrid-electric rotorcraft / R.A. Danis [et al.] // NASA, Ames Research Center. 2018. 81 p. NASA/CR–2018–219897.
3. Harmon F.G. Neural Network Control of a Parallel Hybrid-Electric Propulsion System for a Small Unmanned Aerial Vehicle, Doctor of Philosophy Dissertation, University of California Davis, 2005.
4. Design, modelling and measurement of a hybrid powerplant for unmanned aerial systems / R. Glasscock [et al.] // Australian Journal of Mechanical Engineering. No. 6(2). Pp. 69–78. doi:10.1080/14484846.2008.11464559
5. Reed A Danis, Michael W Green, Jeffrey L Freeman, David W Hall, Examining the Conceptual Design Process for Future Hybrid-Electric Rotorcraft, NASA/CR—2018–219897
6. Hepperle M, Electric Flight—Potential and Limitations. Available online: https://www.mh-aerotoools.de/company/paper_14/MP-AVT-209-09.pdf (Available 30.06.2020).
7. Friedrich C & Robertson P A, Hybrid-Electric Propulsion for Aircraft. Journal of Aircraft, 52(1), 176–189, 2015. doi:10.2514/1.c032660
8. S. M. Kalensky, T.A. Morzeeva, Y. A. Ezrohi, Unconventional propulsion systems for next-generation long-haul aircraft, CIAM proc. No1359, 2019.
9. V.S. Zakharchenko, A.N. Varyukhin, D.Y. Rakhmankulov, P.S. Suntsov, Calculated studies of hybrid power plant efficiency in MVL aircraft, Proceedings of XXX Scientific and Technical Conference on Aerodynamics. Proceedings of the conference dedicated to the 150th anniversary of S.A. Chaplygin's birth. 2019. P. 119-120.
10. Seo JM, Lim HS, Choi BS, Park JY, Park MY. Development Status of Performance Evaluation Systems for 500W Ultra-Micro Gas Turbine Generator // Asian Congress on Gas Turbine 2014, 2014, P. AGGT2014–81.
11. C.H. Park, S.K. Choi, S.Y. Ham. Design and experiment of 400,000 rpm high speed rotor and bearings for 500W class micro gas turbine generator (2011): P. 1–4.

12. Park J. S., Park S., Kim K. M., Choi B. S., Cho H. H. Effect of the thermal insulation on generator and micro gas turbine system // *Energy* Vol. 59 (2013): P. 581–589.
13. Seo, J., Lim, H. S., Park, J., Park, M. R., & Choi, B. S. Development and experimental investigation of a 500-W class ultra-micro gas turbine power generator // *Energy* Vol. 124 (2017): P. 9–18.
14. Seo, J. M., Park, J. Y., Choi, B. S. Start-up and self-sustain test of 500 W ultra-micro gas turbine generator // *Journal of Physics: Conference Series* Vol. 1 Vol. 476 (2013): P. 12060.
15. Peirs, J., Waumans, T., Vleugels, P., Al-Bender, F., Stevens, T., Verstraete, T., Van den Braembussche, R. Micropower generation with microgasturbines: a challenge // *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science* Vol. 221 No. 4 (2007): P. 489–500.
16. Peirs, J., Waumans, T., Al-Bender, F., Reynaerts, D. Experimental verification of compressor performance for an ultra-microgasturbine // *10th Workshop on Micro and Nanotechnology for Power Generation and Energy Conversion Applications* No. 1 (2009): P. 99–102.
17. R. Capata, E. Sciubba, Preliminary Considerations on the Thermodynamic Feasibility and Possible Design of UltraMicro and Nano Gas Turbines, *Proc of 2nd Int. Conf. of Appl. Thermodynamics.*, Istanbul, May 12-15, 2005.
18. R. Capata, E. Sciubba, Effects of the Reynolds Number on the performance of a Nano
19. Compressor, *Proc of 20th ECOS Conf. Padova, Italy, June, 25-28, 2007* 3. R. Capata, E. Sciubba, Progress in the development of a prototype “Ultra-Micro” Gas Turbine Set for Portable Power Generation” *21th ECOS Conf., Gliwice, Poland, June, 24-27, 2008*
20. R. Capata, E. Sciubba, Design and Performance Prediction of a Ultra-Micro Gas
21. Turbine for Portable Power Generation, *Proc of IMECE 2007 Conf. Seattle, Washington, November, 11-16, 2007*
22. R. Capata, E. Sciubba, Further development and preliminary testing of the α – prototype of an ultra-micro gas turbine for portable power generation, *Proc of IMECE 2008 Conf.*
23. Alfonso Calabria, Roberto Capata, Mario Di Veroli, Gianluca Pepe, Testing of the Ultra-Micro Gas Turbine Devices (1 - 10 kW) for Portable Power Generation at University of Roma 1: First Tests Results, *Engineering, Vol.5 No.5(2013)*
24. Кузнецов, А. В., Макарьянц, Г. М., & Кузнецов АВ, М. Г. (2016). Технология создания виртуальной полноразмерной динамической модели ГТД. Самара: Изд-во Самар. ун-та.
25. Кулагин В.В. Теория, расчет и проектирование авиационных двигателей и энергетических установок. М.: Машиностроение, 2003. 616 с.
26. А.Ю. Ткаченко, В.Н. Рыбаков, И.Н. Крупенич, Я.А. Остапюк, Е.П. Филинов Автоматизированная система для виртуальных испытаний газотурбинных двигателей // *Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета*. 2014. № 5(47), ч. 3. С. 113-119.
27. Добрянский Г.В., Мартыанова. Т.С. Динамика авиационных ГТД. М.: Машиностроение, 1989. 240 с
28. Гольберг Ф.Д., Батенин А.В. Математические модели газотурбинных двигателей как объектов управления. М.: Московский авиационный институт, 1999. 82 с.

Ефремов А. О.¹, Кечин А. В.², Левин А. В.¹

¹НПО «НаукаСофт»

²АО «УЗГА»

АВИАЦИОННЫЙ МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР В СОСТАВЕ СИСТЕМЫ ЗАПУСКА И ГЕНЕРИРОВАНИЯ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ

Аннотация: В статье изложены основные результаты разработки магнитоэлектрического стартер-генератора, предназначенного для использования на типовом ближнемагистральном воздушном судне, оборудованный турбовинтовыми двигателями с мощностью до 2000 л.с. Рассмотрены вопросы, связанные с процессами запуска и генерирования электроэнергии, имитационного моделирования, проектирования и расчета элементов конструкции. Предложены конструктивные решения по защите устройства в соответствии с требованиями нормативно-технической документации. Разработанное изделие обеспечивает заданный функционал и отвечает современным требованиям по удельным массовым характеристикам.
Ключевые слова: система генерирования, магнитоэлектрический стартер-генератор, имитационное моделирование, конструирование авиационных электрических машин.

I. ВВЕДЕНИЕ

При разработке современных систем электроснабжения региональных воздушных судов (ВС) с повышенным уровнем электрификации бортового оборудования целесообразно рассмотреть возможность применения магнитоэлектрической синхронной машины в качестве стартер-генераторного агрегата для запуска маршевого двигателя и генерирования электроэнергии переменного тока [1].

Такой агрегат функционирует совместно с полупроводниковым преобразователем запуска и управления, образуя дополнительный канал генерирования нестабильного напряжения и частоты для потребителей без предъявления требований к качеству электроэнергии переменного тока по [2].

Рассматриваемый случай описывает применение такого агрегата на типовом региональном воздушном судне, оснащенный двумя турбовинтовыми двигателями мощностью до 2000 л.с.

Известны достоинства и недостатки магнитоэлектрических синхронных машин [3], особое внимание уделяется проблеме стабилизации выходного напряжения, которая пока ограничивает широкое применение данного типа машин в качестве основного генератора на большинстве ВС. Однако,

обеспечение двигательного режима реализуется известными способами [4], а использование высококоэрцитивных постоянных магнитов позволяет достичь более низких значений относительных индуктивных сопротивлений X_d^* и X_q^* , увеличить жесткость внешней характеристики в генераторном режиме. Это позволяет использовать его в качестве устройства запуска и питания специальных потребителей.

II. РАЗРАБОТКА МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА

Рассматривая магнитоэлектрическую синхронную машину, на этапе эскизного проектирования, необходимо определить систему требований и ограничений. В качестве примера, к рассмотрению представлен экспериментальный образец авиационного стартер-генератора и формализация процесса его проектирования, рис. 1.



Рис. 1. Формализация процесса проектирования авиационного магнитоэлектрического стартер-генератора

В рассматриваемой системе совмещение генераторного и стартерного режима представляет одну из решаемых научно-технических задач. Ограничение мощности бортовых источников электроэнергии для запуска, максимально допустимые значения генерируемого напряжения для указанных

потребителей, коммутационной и защитной аппаратуры – является одним из определяющих критериев при проведении электромагнитного расчета.

А. Электромагнитный расчет

На данном этапе проектирования целесообразно провести расчет генераторного режима работы с целью гарантированного получения заданного диапазона напряжений в рабочей зоне частот вращения.

Стартерный режим характеризуется наибольшими омическими потерями в обмотке якоря, с этой целью линейная нагрузка и плотность тока выбираются так, чтобы обеспечить максимально допустимый тепловой режим работы во время запуска.

С помощью средств численного моделирования проводится поверочный расчет для уточнения электромагнитных характеристик и системы расчетных коэффициентов [5], рис. 2.

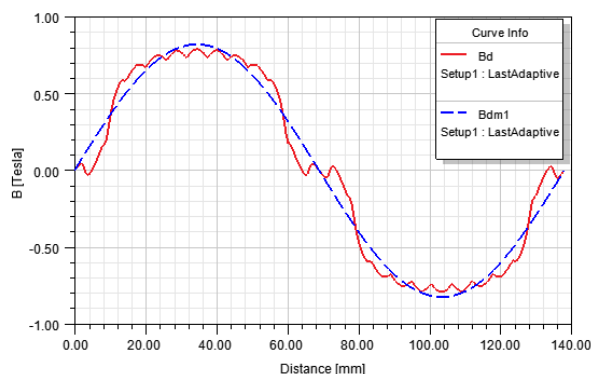


Рис. 2. Магнитное поле в воздушном зазоре стартер-генератора и его первая гармоника

На рис. 3 представлено семейство внешних характеристик, которое лежит в рабочем диапазоне частот вращения стартер-генератора при коэффициенте мощности 0,8.

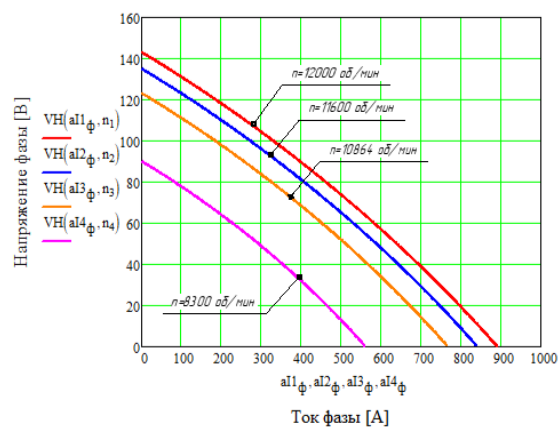


Рис. 3. Семейство внешних характеристик стартер-генератора в рабочем диапазоне частот вращения

Стартерный режим, для машин с $X_d \approx X_q$, оценивается при питании системой трехфазных синусоидальных токов со сдвигом 90 эл. град. по отношению к оси d ротора, при котором достигается максимальное значение электромагнитного момента за единицу тока, такое состояние обеспечивается векторной системой управления во всем диапазоне двигательного режима работы.

В. Тепловой расчет

Для минимизации массогабаритных характеристик электрической машины температура ее составных частей должна соответствовать максимально допустимой для выбранных материалов.

Стартерный режим оказывает наибольшее температурное влияние, его анализ производится с помощью конечно-элементного моделирования. При выполнении 3-х последовательных запусков установившееся значение температуры к окончанию в активной зоне стартер-генератора представлено на рис. 4.

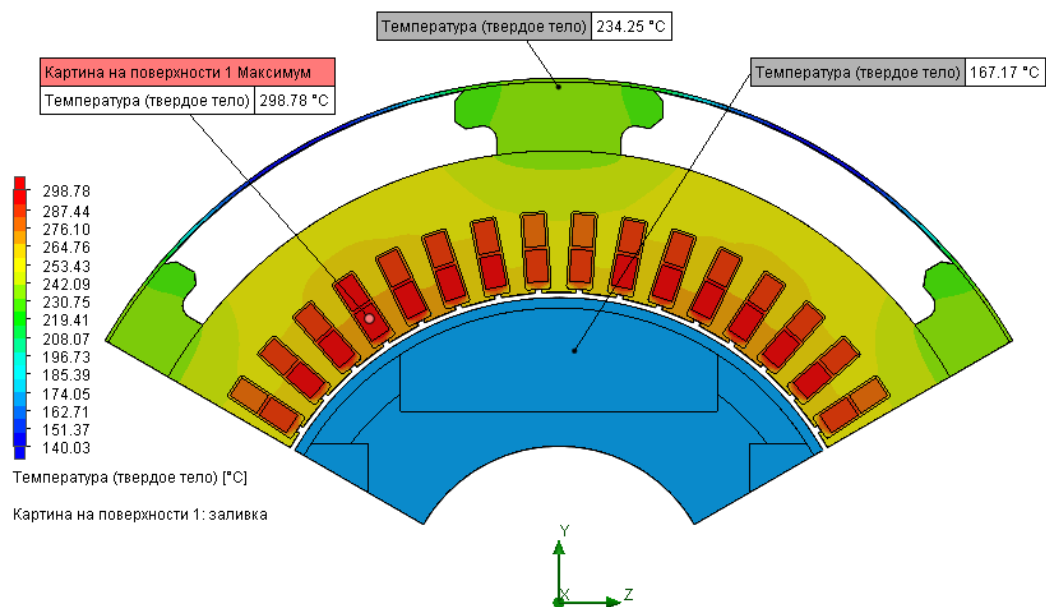


Рис. 4. Температурное поле стартер-генератора после окончания 3 последовательных запусков

Для выбранной марки провода ПНЭТП максимально допустимая кратковременная температура изоляции – 300 °C.

В качестве материала постоянных магнитов используется сплав КС25ДЦ240, он обладает высокими температурными режимами работы без ухудшения свойств до 320 °C [6].

С. Механический расчет

Расчет проводится для определения механической прочности обоймы ротора, удерживающей постоянные магниты под действием центробежных сил, рис. 5.

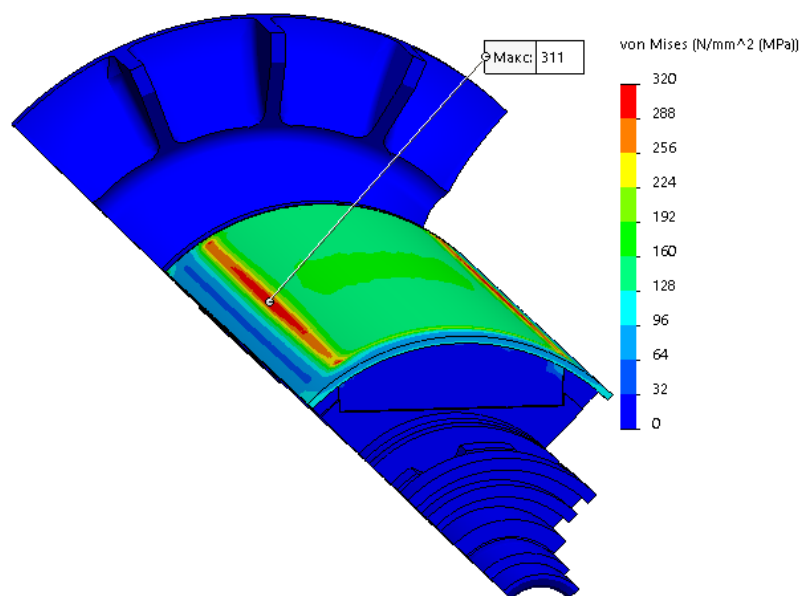


Рис. 5. Механические напряжения в обойме ротора при максимальной частоте вращения

Обойма выполнена из титанового сплава BT5-1, полученные значения внутренних напряжений не превышают допустимого предела текучести на растяжение выбранной марки.

Для определения критической частоты вращения необходимо вычислить максимальный прогиб ротора под действием суперпозиции сил тяжести, одностороннего магнитного притяжения, остаточной неуравновешенности ротора.

На рис. 6 представлен результат расчета суммарного прогиба ротора.

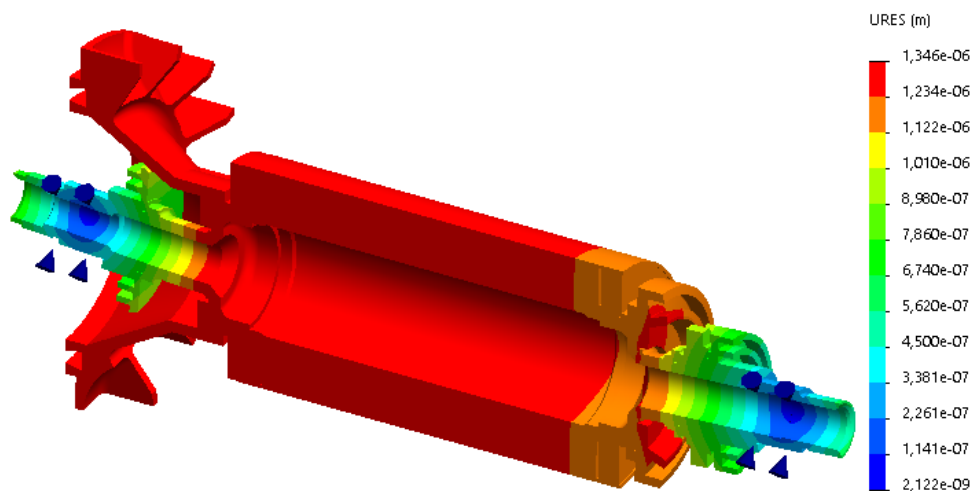


Рис. 6. Прогиб ротора

В результате полученной величины прогиба 0,001346 мм, расчетное значение критической частоты вращения составляет 25858 об/мин, что в 2 раза превышает максимальную в процессе эксплуатации. Также по результатам расчета фиксируются силы реакции подшипниковых опор.

D. Имитационное моделирование

Для комплексной оценки совместной работы стартер-генератора и полупроводникового преобразователя запуска и управления проводится совместное имитационное моделирование. Осциллограмма фазных токов и электромагнитного момента во время раскрутки ротора турбокомпрессора от источника переменного тока 115/200 В, 400 Гц представлена на рис. 7.

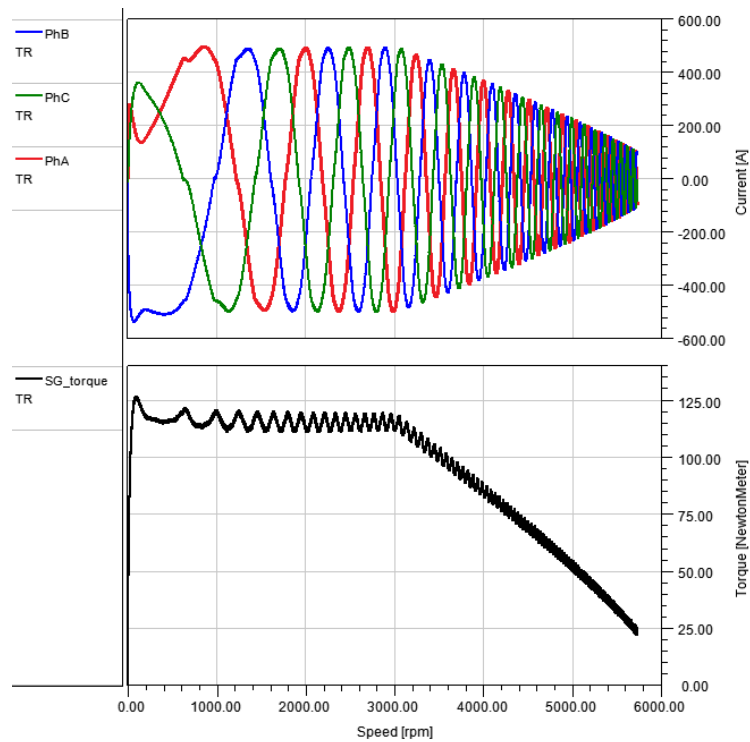


Рис. 7. Осциллограмма фазных токов стартер-генератора и механическая характеристика во время запуска

Механическая характеристика соответствует аналогичной характеристике применяемого воздушного агрегата запуска.

Осциллограмма запуска, с учетом приведенного момента инерции к ротору стартер-генератора имеет вид рис. 8.

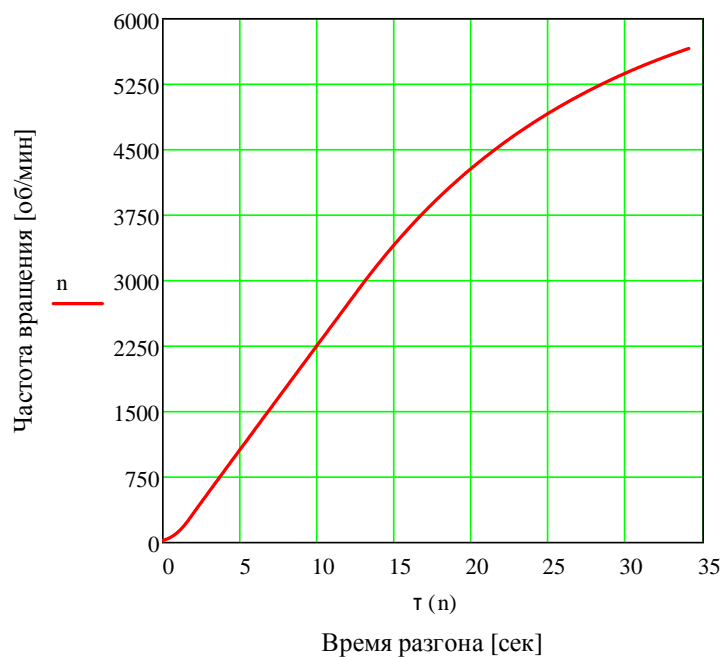


Рис. 8. Осциллограмма запуска

Оценка величины потребляемой мощности, рис. 9, позволяет использовать имеющиеся на борту источники электропитания 115/200 В, 400 Гц для запуска первого маршевого двигателя, следующий запуск может быть осуществлен от работающего стартер-генератора.

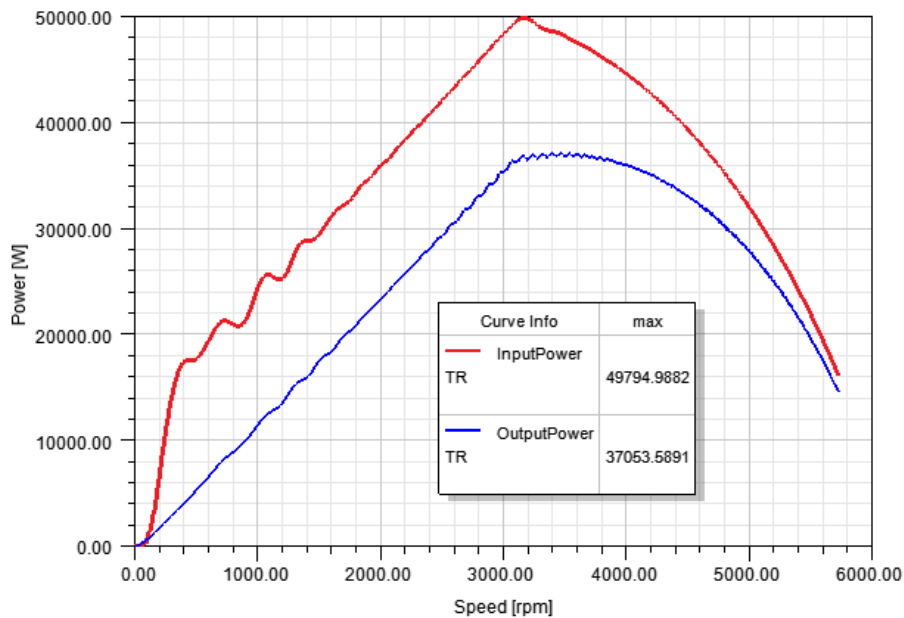


Рис. 9. Осциллограмма потребляемой от источника переменного тока мощности и выходной механической мощности стартер-генератора

Е. Конструктивные особенности проектирования

Конструкция представленного магнитоэлектрического стартер-генератора опирается на традиционные подходы и апробированные решения, применяемые в авиационных электрических машинах для обеспечения безопасного полета [7].

В конструкции магнитоэлектрических синхронных машин одним из менее надежных мест является подшипниковый узел, с этой целью проводится расчет проверки выбранного подшипника по эквивалентной динамической нагрузке, показателям долговечности по методике [8]. На ресурсные показатели также оказывает выбор типа смазки подшипника, в конструкции рассматриваемого стартер-генератора используется консистентная смазка, пополняемая через проточные каналы в щитах.

В таблице 1 приведены некоторые ресурсные показатели выбранного подшипника, на рис. 10 – расчетная схема.

Таблица 1

Результаты расчета подшипниковых опор

Наименование	Опора подшипника	
	I	II
Реакция опоры R , [Н]	45,4	41,1
Динамическая эквивалентная нагрузка Q , [Н]	68,12	61,65
Динамическая грузоподъемность S , [Н]	10790	
Номинальная расчетная долговечность L_H , циклов вращения	$1,19 \times 10^{13}$	$1,39 \times 10^{13}$
Среднее число циклов вращения до отказа по причине потери смазки смазочных свойств L_{cp} , циклов вращения	$4,32 \times 10^{10}$	$1,28 \times 10^{11}$
Вероятность безотказной работы	0,999826	0,999875

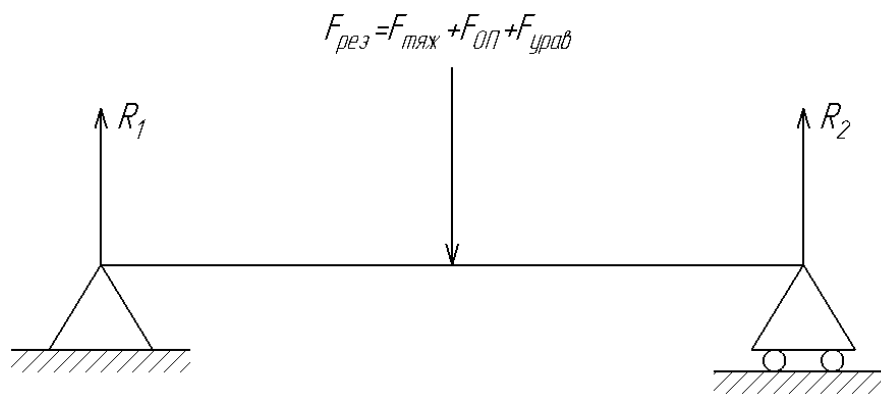


Рис. 10. Расчетная схема подшипниковых опор:

$F_{рез}$ – результирующая сила, $F_{тяж}$ – сила тяжести ротора,
 $F_{опп}$ – сила одностороннего магнитного притяжения по направлению к эксцентриситету ротора, $F_{уров}$ – сила от допустимого остаточного дисбаланса ротора,
 $R_{1,2}$ – силы реакции подшипниковых опор

Ф. Способы обеспечения защиты от аварийных режимов работы

В соответствии с требованиями [9] все бортовые источники электропитания должны удовлетворять соответствующим требованиям аварийного отключения, защиты от КЗ, обрыва фаз и т.д.

Магнитоэлектрическая синхронная машина, несмотря на простоту конструкции, сложно поддается удовлетворению указанных стандартом требований. При вращении приводом, магнитное поле постоянных магнитов будет продолжать наводить в короткозамкнутых витках обмотки ЭДС даже после электрического отключения от бортсети, что неизбежно приведет к скорому повреждению обмотки. Одним из решений этой проблемы является полное механической расцепление с приводом с помощью механизма расцепления. Например, при возникновении КЗ между одной из фаз и нейтралью, под действием тока КЗ и зубцового момента, время выбега ротора, по расчетной оценке, составляет не более 0,5 с. Данное решение позволяет комплексно решить случаи возникновения остальных возможных аварийных ситуаций.

В качестве механизма расцепления выступает муфта с торцевым зацеплением Хирта, которую выводит из зацепления шток электромагнита. Сигнал на электромагнит может поступать от срабатывания продольной дифференциальной токовой защиты, которой оборудован стартер-генератор, датчика температуры обмотки, вращающегося трансформатора на роторе, по командам от полупроводникового преобразователя запуска и управления в случае возникновения аварийных режимов работы. Стартер-генератор также имеет слабое звено, которое предотвращает последствия значительных механических повреждений. На рис. 11 представлен результат конечно-элементного расчета муфты сцепления-расцепления стартер-генератора при аварийном отключении.

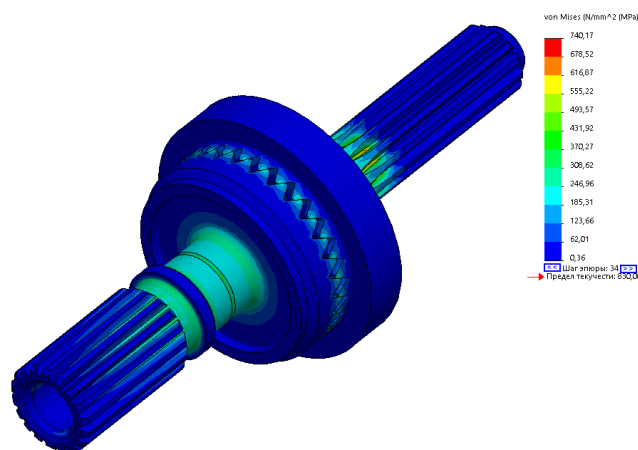


Рис. 11. Механические напряжения в муфте во время расцепления

Профиль торцевых зубьев муфты обеспечивает надежный контакт полумуфт с передачей крутящего момента как в стартерном, так и в генераторном режиме во всем диапазоне частот вращения и гарантированное расцепление.

Таким образом, спроектированный магнитоэлектрический стартер-генератор удовлетворяет указанным требованиям нормативно-технической документации для авиационного электрооборудования, способен выполнять запуск маршевого двигателя и обеспечивать электроэнергией переменного тока с нестабильным уровнем напряжения в заданном диапазоне частот вращения специальных потребителей в предъявляемых условиях эксплуатации. Удельная масса экспериментального образца, по 3D модели на рис. 12, составляет – 0,575 кг/кВт.

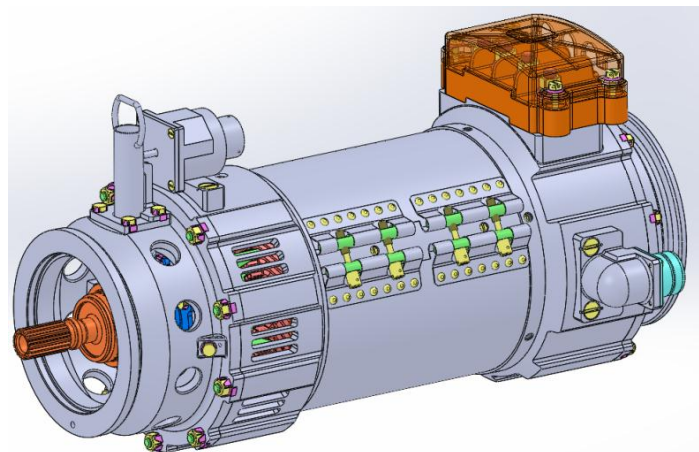


Рис. 12. 3D-модель магнитоэлектрического стартер-генератора

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Левин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А., Ковалев К.Л., Герасин А.А., Халютин С.П.; под ред. Мусина С.М. / Электрический самолет: концепция и технологии [Текст]; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т. — Уфа: УГАТУ, 2014. — 388 с.
2. ГОСТ Р 54073-2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. — М.: Стандартиформ, 2010. — 33 с.
3. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины [Текст] / Д.А. Бут. — М.: Высшая школа, 1990. — 415 с.
4. Аничин А.С. Системы управления электроприводов. [Текст] — М.: Издательский дом МЭИ, 2015. — 373 с.
5. Зечихин Б.С. Электрические машины летательных аппаратов. Гармонический анализ активных зон. [Текст] — М.: Машиностроение, 1983. — 150 с.
6. Грузков С.А., Останин С.Ю., Сугробов А.М., Сульдин А.В., Таланов Л.Л., Тыричев П.А. Магнитные материалы, обмоточные, монтажные и бортовые провода для систем электрооборудования летательных аппаратов. [Текст] — М.: МЭИ, 2005. — 181 с.
7. Поспелов, Л.И. Конструкции авиационных электрических машин [Текст] / Л.И. Поспелов. — М. Энергоиздат, 1982. — 314 с.
8. ОСТ 1 00151-88 Машины электрические авиационные. Методы расчета количественных показателей безотказности. — М.: Стандартиформ, 1988 — 54 с.
9. ОСТ 1 00818-86 Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования к структуре типовых систем. — М.: Стандартиформ, 1986 — 39 с.
10. Сугробов А.М., Русаков А.М. Проектирование электрических машин автономных объектов. Учебное пособие для вузов [Текст] — М.: Издательский дом «МЭИ», 2012 — 304 с.
11. Алабин М.А., Кац Б.М., Литвинов Ю.А. Запуск авиационных газотурбинных двигателей. [Текст] — М.: Изд-во «Машиностроение» 1968 г. — 228 с.
12. Левин А. В. и др. Стартер-генераторная система для вспомогательной силовой установки //Научный вестник Московского государственного технического университета гражданской авиации. — 2017. — Т. 20. — №. 5. — С. 50-66.

Жарков Е. О., Янтураев М. Ю., Гарипов И. Р., Исмагилов Ф. Р., Вавилов В. Е.
ФГБОУ ВО «УУНиТ»

СРАВНЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ ОДНОРОТОРНОЙ И АКСИАЛЬНОЙ ДВУХРОТОРНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ ДЛЯ ПРИВОДА ВИНТА СВЕРХЛЕГКОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА¹

Аннотация: В данной работе приводится сравнение радиальной и аксиальной конструкции электродвигателя. Показано, что аксиальная компоновка позволяет существенно повысить удельную мощность. Описаны проблемы, с которыми столкнулись авторы при разработке аксиального электродвигателя.

Ключевые слова: постоянные магниты, аксиальная электрическая машина, воздушное охлаждение.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0838-2020-0006.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электродвигатели (ЭД) с постоянными магнитами при сравнении с другими типами ЭД обладают наибольшей удельной мощностью, надежностью и эффективностью, также к их положительным качествам можно отнести низкие пульсации момента и высокий пусковой момент. Этот тип ЭД является наиболее перспективным в авиастроении, где требуется минимальная масса и высокая надежность.

В последнее время набирает популярность аксиальный тип синхронного ЭД с постоянными магнитами, причем в конструкции в большинстве случаев применяется два ротора и один статор. По словам производителей такого рода ЭД, она выгодно отличается от радиального аналога по своей удельной мощностью и осевым габаритам.

В разных источниках потребная частота вращения вала для прямого привода винта самолета составляет не более 2700 об/мин 1-4. Поэтому для расчетов принимается частота вращения равная 2700 об/мин. Наиболее известными производителями аксиальных электрических машин являются YASA Limited и EMRAX. Электродвигатель YASA 750 при массе 37 кг, частоте вращения 2700 об/мин и жидкостном охлаждении способен выдать 113 кВт 5, что соответствует удельной мощности 3 кВт/кг. Электродвигатель EMRAX 348 при массе 41 кг и частоте вращения 2700 об/мин способен выдать 113 кВт при воздушном охлаждении, что соответствует 2,75 кВт/кг, и 141 кВт при жидкостном, что соответствует 3,4 кВт/кг 6.

II. СРАВНЕНИЕ РАДИАЛЬНОЙ И АКСИАЛЬНОЙ КОНСТРУКЦИИ

Было проведено моделирование обоих вариантов электродвигателей методом конечных элементов. Частота вращения как было сказано выше принята равной 2700 об/мин, момент на валу – 250 Нм, охлаждение – воздухом при температуре окружающей среды 30°C.

Радиальный ЭД был рассчитан в варианте с внешним и внутренним ротором. Значительного влияния расположение индуктора на массу активной

части не оказало. Постоянные магниты выбраны из сплава неодим железо бор марки N45UH с остаточной индукцией 1,35 Тл и максимальной рабочей температурой 180°С. Магнитопровод ротора выполняется из магнитно-мягкого кобальто-железного сплава. Картина магнитного поля полученных ЭД показана на рис. 1 и 2, сравнение полученных электрических машин – в таб. 1.

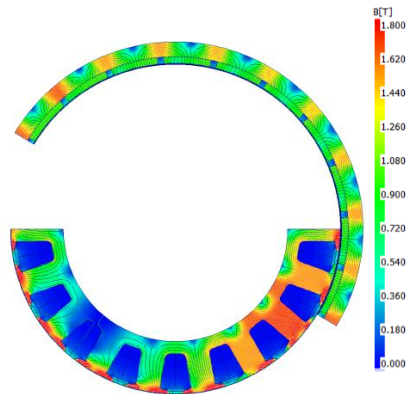


Рис. 1. Картина магнитного поля радиального ЭД с внешним ротором

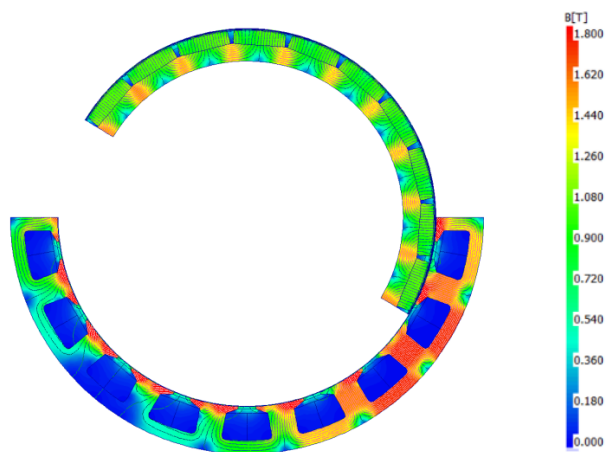


Рис. 2. Картина магнитного поля радиального ЭД с внутренним ротором

Результаты моделирования

Тип ЭД	Аксиальный двухроторный	Радиальный (внешний ротор)	Радиальный (внутренний ротор)
Количество пазов/полюсов	18/20	18/20	18/20
Плотность тока	10	13	13
Линейная токовая нагрузка	72 кА/м	71 кА/м	71 кА/м
Материал магнитопровода статора	3412 0,27 мм	49К2Фа 0,35 мм	49К2ФА 0,35 мм
Марка постоянных магнитов	N45UH	N45UH	N45UH
Масса магнитопровода статора	2,9 кг	5,8 кг (+100%)	5,9 кг (+103%)
Масса магнитопровода ротора	3,3 кг	3,7 кг (+13%)	2,9 кг (-12%)
Масса обмотки	2,8 кг	3,7 кг (+28%)	3,8 кг (+35%)
Масса постоянных магнитов	1,4 кг	1,3 кг (-7%)	2,3 кг (+64%)
Масса активной части	10,4 кг	14,5 кг (+39%)	14,9 кг (+43%)
Полная масса	18,5 кг	25-29 кг (ориенти- ровочно)	25-29 кг (ориенти- ровочно)
Максимальная температура обмотки	~140°C	~220°C	~200°C
Потери в меди	800 Вт	1900 Вт	2020 Вт
Потери в стали статора	410 Вт	1000 Вт	1040 Вт
Потери в роторе	550 Вт	600 Вт	520 Вт
Суммарные потери	1760 Вт	3500 Вт	3580 Вт
Электромагнитный КПД	97,5%	95,3%	95,2%

Масса радиального ЭД сокращена на сколько это было возможно, пришлось даже прибегнуть к применению дорогостоящего кобальто-железного сплава для магнитопровода статора (и закрыть глаза на то, что невозможность посадки его в корпус с натягом существенно ухудшает условия теплоотвода) и к повышению плотности тока на 30%, относительно аксиального ЭД, что является предельным значением для воздушной системы охлаждения. Даже несмотря на это масса радиального варианта получилась на 39-42% выше. Особенно существенная разница наблюдается в массе магнитопровода статора, которая в радиальном исполнении увеличилась на 100-103%. По этой причине далее будет рассматриваться лишь аксиальный ЭД.

Конструктивно спроектированный аксиальный ЭД аналогичен упомянутым выше электродвигателям YASA и EMRAX. Между двумя роторами с аксиальным расположением постоянных магнитов располагается магнитопровод статора с катушками. Магнитопровод статора выполняется без ярма, обмотка – зубцовой. Данный вариант является наиболее удачным по нескольким причинам, которые будут описаны ниже.

А. Особенности конструкции магнитопровода статора

Для начала рассмотрим активную часть статора, которая состоит из ферромагнитных зубцов и намотанных на них катушек (рис. 3).

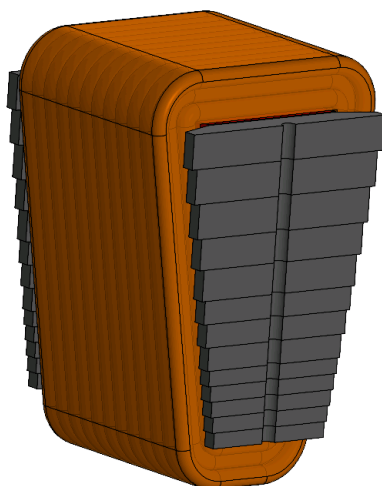


Рис. 3. Обмотанный зубец

Относительно радиального исполнения такая схема имеет несколько существенных преимуществ. Отдельная намотка катушек на каждый зубец вкупе с применением жил большого сечения позволяет получить коэффициент заполнения паза выше, чем в случае с радиальной конструкцией, что равно меньшим потерям при той же площади паза и большей теплопроводности катушки.

Аксиальное прохождение магнитного потока вносит существенные изменения в магнитопровод статора. Из-за отсутствия ярма статора, магнитный поток проходит по нему лишь в одном направлении. Это позволяет применить анизотропную электротехническую сталь, которая обладает более высокими магнитными свойствами. К примеру, анизотропная сталь марки 3412 при

напряженности магнитного поля 2500 А/м имеет магнитную индукцию 1,85 Тл, в то время как изотропный аналог – 2412 – лишь 1,5 Тл. Казалось бы, это должно привести к существенному снижению сечения зубца, но необходимость применения шихтовки снижает положительный эффект от применения анизотропной стали. Шихтовка осуществляется в радиальном направлении. По причине того, что отношение ширины постоянного магнита к ширине зубца в нижней его части больше, приходится подбирать ширину зубца исходя из насыщения в этой области. Картина распределения магнитного поля в сечении зубца показана на рис. 4.

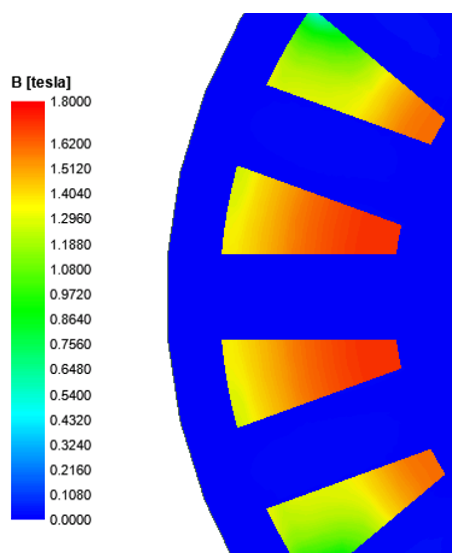


Рис. 4. Картина распределения магнитного поля в сечении зубца 3412

Учитывая коэффициент заполнения сталью выходит, что в нижней части зубца магнитная индукция достигает 1,88 Тл, в верхней – лишь 1,5 Тл. Таким образом из-за наличия шихтовки в радиальном направлении магнитный поток не может перераспределиться по высоте зубца, что приводит к неэффективному использованию его сечения.

Существует два альтернативных варианта. Первый – применения магнитно-мягкого композита, второй – кобальто-железного магнитно-мягкого сплава.

Магнитопровод из магнитно-мягкого композита получается формовкой металлического порошка, каждая частица которого покрыта изоляцией.

Для расчетов был принят материал Somaloy 1000 P3 от компании Höganäs. Он обладает наиболее высокой магнитной проницаемостью в средних полях по сравнению с другими порошками данной компании. Но такой материал все же не обладает выдающимися магнитными свойствами. При напряженности магнитного поля 2500 А/м магнитная индукция составляет лишь около 1,25-1,30 Тл. Стоит отметить, что в готовом магнитопроводе данный материал имеет магнитные свойства лишь немного более низкие чем 2412, потому что при использовании магнитно-мягкого композита коэффициент заполнения магнитопровода сталью уже заложен в свойствах материала. Картина распределения магнитного поля в зубце из Somaloy 1000 3P показана на рис. 5.

Распределение магнитной индукции по высоте зубца становится практически равномерным. В нижней его части она составляет 1,51 Тл, в верхней – 1,48 Тл. ЭДС при этом снижается не более чем на 1,5%. Негативной стороной применения такого материала является его существенно более высокие удельные потери, которые ориентировочно в два раза выше, чем в случае с классической листовой электротехнической сталью, положительной – его большая технологичность и одинаковая во всех направлениях теплопроводность.

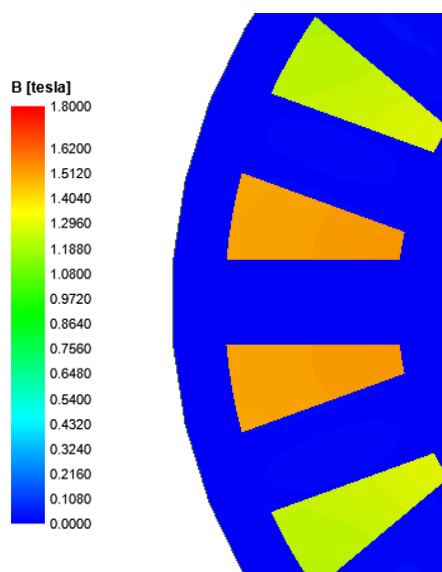


Рис. 5. Картина распределения магнитного поля в сечении зубца из Somaloy 1000 3P

Второй альтернативный вариант – использование кобальто-железного магнитно-мягкого сплава (49К2ФА), который будучи изотропным позволяет получить около 2,0-2,2 Тл при 2500 А/м. Применение данного сплава в большинстве случаев сопряжено с существенным ростом стоимости магнитопровода в связи с низким использованием листа, большим количеством отходов при производстве и высокой себестоимостью материала, которая в десятки раз выше по сравнению с кремнистой сталью. Но если рассматривать зубец аксиального ЭД, то окажется, что лишь 40-50% материала остается не использованным, да и самого материала необходимо на столько мало, что переход на кобальто-железный сплав не окажет значительного влияния на стоимость ЭД. Более того можно комбинировать данный сплав с анизотропной сталью, выполняя из 49К2ФА лишь нижнюю, более нагруженную часть зубца. Таким образом расход материала может составить всего около 3,0-3,5 кг. Если сравнивать с радиальным ЭД, то в данном случае расход должен составить около 26 кг (использование материала – 23%) при изготовлении из цельного листа, и 18 кг (использование материала – 32%) при изготовлении из четырех отдельных сегментов.

В варианте с применением кобальто-железного сплава ЭДС при тех же размерах зубца выросла на 7%, что довольно существенно и оправдывает его применение. Может показаться, что разница между 49К2ФА и 3412 в магнитных свойствах не на столько высокая, чтобы применение 49К2ФА привело к росту магнитного потока на 7%, но его изотропия оказывает большое влияние в области шлица паза, где магнитный поток проходит в невыгодном для 3412 направлении.

Отдельно стоит отметить процесс сборки зубца из шихтованной стали, который усложняется тем что необходимо изготовить расширяющийся зубец, при этом не делая полностью открытый паз. Из-за сложности получения такой формы приходится выполнять зубец ступенчатым по высоте (рис. 2), то есть набранным из листов разной ширины. В представленном зубце количество

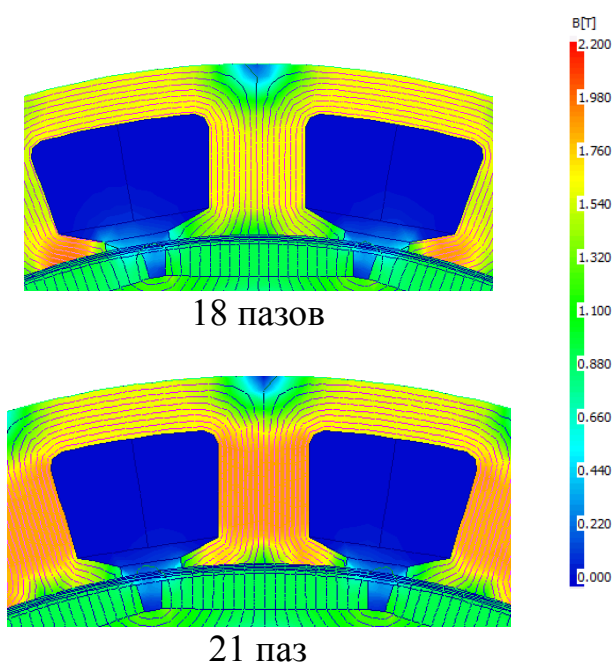
различных типов листов равняется 13, что несомненно усложняет изготовление, а также увеличивает тепловое сопротивление между катушкой и зубцом.

В. Соотношение количества пазов к количеству полюсов

Подбор соотношения количества пазов к количеству полюсов является многофакторной задачей. Основные критерии выбора этого соотношения: масса магнитопровода статора, зубцовый момент, индуктивность фазы, потери в роторе, обмоточный коэффициент, коэффициент гармонических искажений, возможное количество параллельных ветвей.

Наиболее часто в электродвигателях при выборе между различными типами зубцовых обмоток стараются делать количество пазов чуть меньше, чем количество полюсов. Рассмотрим каждый из критериев выбора зубцовой обмотки по отдельности. Первый – масса магнитопровода.

Был проведен расчет различных сочетаний пазов к полюсам. При 20 полюсах было рассмотрено 5 вариантов: 18, 21, 24, 30, 60 пазов. Расчет проводился для радиального ЭД (для упрощения расчета) при одинаковых роторах, диаметрах статора, массе зубцов и спинки. Результаты моделирования магнитного поля показаны на рис. 6. Для того чтобы показать разницу между зубцовыми и распределенными обмотками была рассмотрена также одна распределенная.



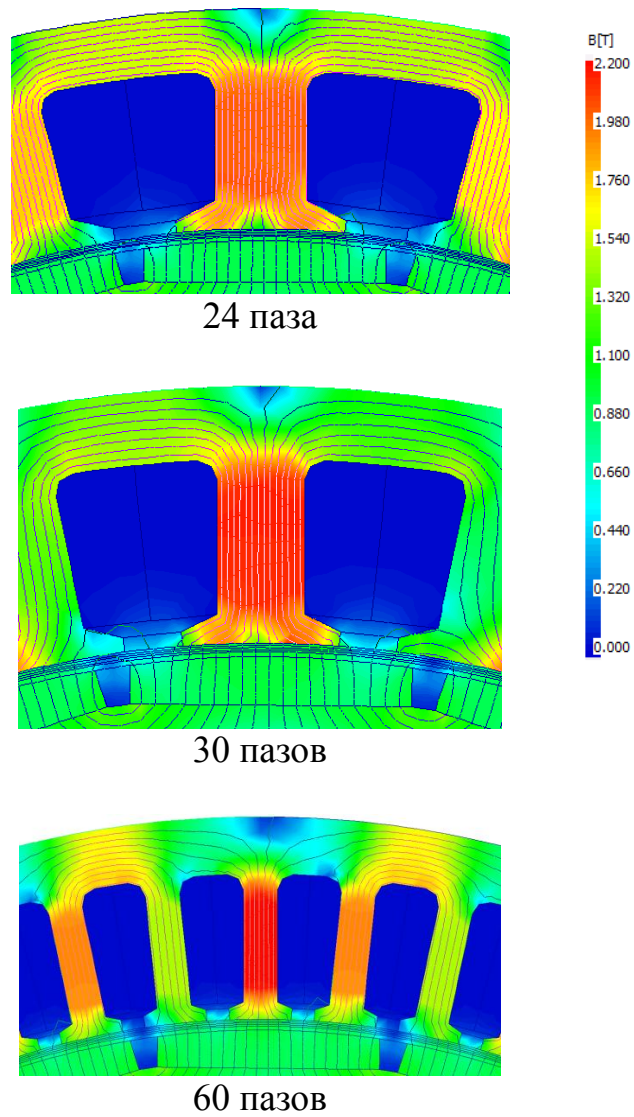


Рис. 6. Картина магнитного поля статора при различном количестве пазов

Из рис. 6 видно, что количество пазов серьезно влияет на уровень магнитной индукции в спинке и зубце. В таб. 2 показано сравнение уровня магнитной индукции при разном количестве пазов.

Таблица 2

Результаты сравнения магнитных индукций

Количество пазов	18	21	24	30	60
Магнитная индукция в зубце, Тл	1,62	1,85	1,98	2,12	2,19
Магнитная индукция в спинке, Тл	1,62	1,60	1,57	1,57	1,67

По результатам расчетов видно, что с уменьшением количества пазов индукция в зубце при фиксированной массе зубцов снижается, а значит можно снизить его сечение, либо увеличить магнитный поток. Минимизация количества пазов таким образом позволяет минимизировать массу зубца. В таб. 3 сведено сравнение ЭМ по остальным критериям. Некоторые параметры показаны в относительных единицах относительно варианта с количеством пазов равным 18.

Таблица 3

Результаты сравнения ЭМ с разным количеством пазов

Количество пазов	18	21	24	30	60
Обмоточный коэффициент	0,945	0,953	0,933	0,866	1,000
Потери в роторе на синусоидальном токе (в о.е.)	1,00	0,71	0,47	0,21	0,03
Суммарная ширина зубцов (в о.е.)	1,00	1,14	1,22	1,31	1,35
Возможное количество параллельных ветвей	1,2	1	1,2,4	1,2,5,10	1,2,5,10
Зубцовый момент (относительно номинального момента)	~0	~0	~0	±25%	±20%
Линейная индуктивность (в о.е.)	1,00	0,86	0,67	0,51	0,52
Коэффициент гармонических искажений	1,65%	1,71%	2,08%	6,48%	9,23%

По результатам расчетов можно сделать следующие выводы: со снижением количества пазов зубцовой обмотки снижается суммарная ширина и масса зубца, ЭДС становится более синусоидальным, растет индуктивность фазы и потери в роторе, увеличивается перепад температур в катушке между наружными и внешними слоями из-за роста ее толщины. Зубцовый момент во всех зубцовых обмотках кроме случая с 30 пазами составляет пренебрежимо малое значение относительно номинального момента.

Для электродвигателя важен высокий обмоточный коэффициент, малая масса магнитопровода, высокая индуктивность (для сглаживания пульсаций тока от ШИМ и эффективного ослабления поля), малый коэффициент гармонических искажений, минимальные потери в роторе. Всем этим

требованиям кроме последнего в наибольшей степени удовлетворяют варианты с 18 и 21 пазми. Но для данного электродвигателя из-за низкого питающего напряжения и больших токов требуется разделение обмотки на две параллельные ветви, чтобы каждую подключить к отдельному инвертору. По этой причине количество пазов было принято равным 18. Высокие потери в роторе будут компенсироваться интенсивным охлаждением.

С. Охлаждение ЭД в аксиальном исполнении

Далее рассмотрим охлаждение ЭД. Эффективному отводу тепла в такой конструкции способствуют два фактора. Первый – это прямой контакт катушек с алюминиевым корпусом (рис. 7), который является основным путем отвода тепла от обмотки. Одной из причин применения зубцовой обмотки, а не распределенной является именно необходимостью создания прямого контакта корпуса с обмоткой. Бóльшая технологичность зубцовой обмотки является вторичной причиной.

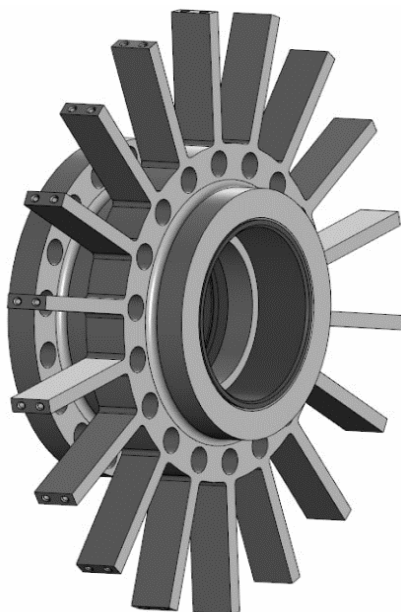


Рис. 7. Корпус статора

Второй – это использование ротора в качестве своеобразного центробежного вентилятора. Если рассматривать радиальный ЭД, то вращение ротора приводит лишь к перемешиванию воздуха в воздушном зазоре, но движение воздуха в осевом направлении не возникает. По этой причине

радиальному ЭД требуется либо установка вентилятора на вал, либо обдув от внешнего источника. В случае с аксиальным ЭД поверхности ротора, направленные в воздушный зазор, располагаются вертикально и создают движение воздуха в радиальном направлении. Вход воздуха происходит через каналы в торцах статора и ротора, выход – через каналы на внешнем диаметре ротора (рис. 8).

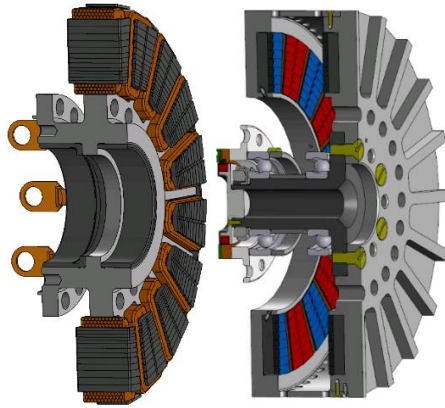


Рис. 8. Конструкция статора (слева) и ротора (справа)

Такого охлаждения при частоте вращения 2700 об/мин достаточно, уровень нагрева элементов электрической машины показан на рис. 9. Расчет проводился по упрощенной геометрии, в которой отсутствует оребрение ротора, поэтому в реальности уровень его нагрева должен быть меньше.

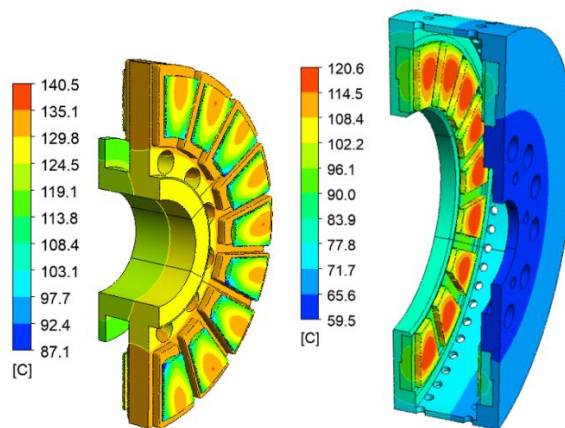


Рис. 9. Уровень нагрева статора (слева) и ротора (справа)

D. Особенности конструкции ротора

Отдельное внимание стоит уделить конструкции ротора. Одна из проблем, которая проявляется в аксиальном ЭД заключается в некомпенсированном магнитном притяжении между ротором и статором. В случае с радиальным ЭД притяжение постоянных магнитов к статору распределяется равномерно по окружности и направлено в радиальном направлении, поэтому векторная сумма этих сил при отсутствии эксцентриситета равна нулю. В аксиальном ЭД силы притяжения между статором и ротором сонаправлены, что приводит к появлению изгиба в конструкции под действием этих сил. Для минимизации прогиба приходится утяжелять корпусные элементы. В двухроторной конструкции эта проблема решается установкой кольца между роторами, которое предотвращает их прогиб, таким образом нивелируется этот недостаток аксиального ЭД.

Второй особенностью ротора является его магнитопровод. Проблема зубцовых обмоток заключается в том, что их магнитодвижущая сила содержит большой процент паразитных гармоник, которые создают высокие потери в постоянных магнитах и магнитопроводе. На рис. 10 показан уровень магнитной индукции в сечении магнитопровода ротора.

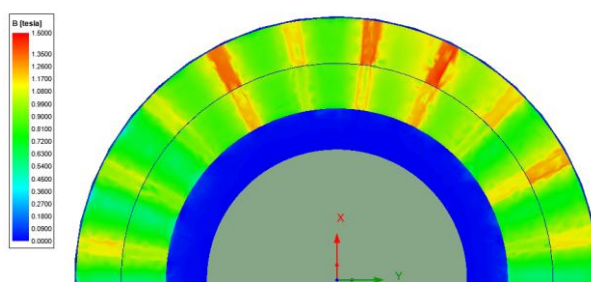


Рис. 10. Картина распределения магнитной индукции в сечении ротора

Под действием реакции якоря образуется большая неравномерность в магнитной индукции между полюсами, которая при вращении также меняет свое положение. Уровень магнитной индукции между полюсами колеблется от 1 Тл до 1,45 Тл, что приводит к выделению около 2 кВт потерь на каждый нешихтованный магнитопровод. Для снижения уровня потерь приходится

прибегнуть к шихтовке магнитопровода. Процесс шихтовки усложняется тем, что невозможно выполнить магнитопровод из листов стали как это делается в радиальном ЭД, так как часть пути магнитный поток будет проходить поперек листов. По этой причине было принято решение выполнять шихтовку навивкой магнитопровода магнитно-мягкой лентой марки 2421. Альтернативным вариантом является применение магнитно-мягкого композита Somaloy 1000 ЗР, но по причине того, что на данный момент технология не освоена выбор пал на навитый магнитопровод.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведенной работы было показано, что аксиальная конструкция позволяет сократить массу активной части на 30%, при этом такая конструкция не требует дополнительной установки вентилятора или принудительного обдува так как вращение ротора приводит к появлению расхода воздуха через машину. Полная масса аксиальной ЭМ с вращающим моментом 250 Нм при частоте вращения 2700 об/мин составила 18,5 кг.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Thomas F. Talerico, Andrew D. Smith, Jerald T. Thompson, Emma L. Pierson, Cullen A. Hilliker, and David Avanesian, "Outer Mold Line Cooled Electric Motors for Electric Aircraft", AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2020.
2. Hiroshi Mitsuda, Yoshihiro Miyama, Kazumasa Ito, Masaki Yamada, and Hisatoshi Fukumoto, "Design of Electric Machine for Electric Aircraft: A Case Study of Rotor-stator Configurations and Magnet Arrangements", AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS), 2020
3. Arthur Dubois, Martin van der Geest and Joe Ben Bevirt, "Design of an Electric Propulsion System for SCEPTOR", 16th AIAA Aviation Technology, Integration, and Operations Conference, 2016.
4. Jean-Michel Grenier, Ramón Perez, Mathieu Picard and Jerome Cros, "Magnetic FEA Direct Optimization of High-Power Density, Halbach Array Permanent Magnet Electric Motors", *Energies* 2021, 14, 5939.
5. YASA, [Online]. Available: <https://www.yasa.com> [Accessed November 2022]
6. EMRAX INNOVATE E-MOTORS, [Online]. Available: <https://emrax.com> [Accessed November 2022]

Железняк В. Н.¹, Бурмистров А. А.¹, Коровкин Н. В.²

¹АО «Силовые машины завод «Электросила»

²Высшая школа высоковольтной энергетики СПбПУ

КОМПЛЕКС УДАРНОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА: ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ ОСОБЕННОСТИ

Аннотация: Для испытаний различного электротехнического оборудования и обеспечения необходимой мощности короткого замыкания в лабораториях большой мощности испытательных центров устанавливаются ударные турбогенераторы. Для испытаний мощного силового электрооборудования необходимо применение ударных турбогенераторов, работающих в комплексе с вспомогательным оборудованием. В статье описаны функции комплекса ударного генератора по типам оборудования и основные режимы работы ударных генераторов в комплексе. Предложено описание схемы синхронизации и параллельной работы нескольких ударных генераторов.

Ключевые слова: ударный турбогенератор, мощность короткого замыкания, модельная мощность, испытательный центр, эксплуатационные режимы, параллельная работа ударных генераторов.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время к электротехническому оборудованию (трансформаторам, выключателям и др.), устанавливаемому на электростанциях и подстанциях, предъявляются жесткие требования к стойкости в динамических режимах, а именно к механической прочности после прохождения короткого замыкания (КЗ) и термической стойкости при действии повышенных токовых нагрузок. Для выполнения необходимого объема испытаний электротехнического оборудования создаются специализированные испытательные центры, в состав которых входят устройства большой мощности, способные обеспечить испытания в динамических режимах. Наличие подобных испытательных центров определяется стратегией развития электроэнергетики на государственном уровне [1]. В результате имеем оборудование, позволяющее обеспечить высокую эксплуатационную надежность энергосистемы и энергоснабжения потребителей [8].

Испытуемое оборудование устанавливается в испытательной камере – отдельном, специально оснащем помещении в пределах лаборатории большой мощности. Испытательная камера, в первую очередь, предназначена для физической защиты основного оборудования испытательного центра и

персонала в случае нештатных ситуаций при испытаниях, а также позволяет достаточно просто размещать и подключать к испытательной схеме объекты исследования. Важно, что все оборудование и электрические схемы стенда до места подключения испытуемого оборудования в камере должны иметь фиксированные электрические характеристики для ведения режима испытаний и последующего расчета. Так с достаточной для анализа процессов точностью должно быть известно индуктивное сопротивление токопроводов, испытательных трансформаторов, выключателей и ударного турбогенератора и т.п.

Для создания мощного импульса тока (определенных длительности и мощности) в лабораториях испытательных центров применяются ударные турбогенераторы, предназначенные для работы в режимах КЗ (трехфазных и двухфазных) с заданной периодичностью. В мире функционирует достаточно большое количество испытательных центров, имеющих соответствующее оборудование [10]. В таблице I приведена информация по некоторым из них.

II. ОПЫТ ПРОЕКТИРОВАНИЯ И ИЗГОТОВЛЕНИЯ УДАРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ

Начиная с 1930-х гг., в СССР на заводе «Электросила» была спроектирована серия ударных турбогенераторов ТИ модельной мощностью от 2,5 до 100 МВ·А. С 1955 по 1970 гг. изготовлено и установлено в испытательных лабораториях России, Румынии, Польши и Китая 10 агрегатов типа ТИ-100-2. Наиболее мощные находящиеся в эксплуатации в России ударные генераторы типа ТИ-100-2 установлены в НИЦ (научно-исследовательском центре) в Бескудниково (два агрегата) [3, 9] и ВЭИ (один агрегат). Паспортные данные генератора ТИ-100-2 приведены в таблице II.

По сравнению с традиционными турбогенераторами, ударные генераторы имеют повышенную механическую и электрическую прочность и значительно меньшие индуктивные сопротивления x'_d и x''_d , определяющие переходные и сверхпереходные токи в процессе КЗ.

Таблица 1

Испытательные центры

Наименование	DNV KEMA		CESI group	Schaltwerk in Berlin	ABB	
Лаборатория	<i>Keuring van Elektrotechnische Materialen te Arnhem</i>		<i>Centro Elettrotecnica Sperimentale Italiano</i>	<i>High-Power Testing Laboratory</i>	<i>High Power Laboratory</i>	
Город, страна	Арнем, Нидерланды		Милан, Италия	Берлин, Германия	Людвика, Швеция	
Изготовитель	Alstom		н/д	Siemens	ASEA	
Количество агрегатов	4	2	н/д	3=6400 МВ·А (35 кВ, 120кА)	2	
Мощность КЗ, МВ·А	2 100	2 100	2100	2800	2 500	1 300
Модельная мощность, МВ·А	н/д	н/д	н/д	200	180	130
Частота, Гц	50	50	16 ² / ₃ /50/60	50/16 ² / ₃	50/60	50
Частота вращения, об/мин	3000	3000	н/д	750	1500	1500
Номинальное напряжение, кВ	н/д	н/д	н/д	19 (Y)/11 (Δ) max-21	7.5/13/15/26 (26 кВ только при 25 и 16 ² / ₃ Гц)	4.33/7.5/8.67/15

Таблица 2

Характеристики ударного генератора ТИ-100-2

Наименование параметра	Величина
Модельная мощность, МВ·А	100
Мощность короткого замыкания (в испытательной камере), МВ·А	2500
Номинальное напряжение, кВ	10
Частота вращения, об/мин	3000
Соединение фаз обмотки статора	Y/Δ

А именно для традиционных турбогенераторов в соответствии с ГОСТ ИЕС 60034-3-2015 [11] величина сверхпереходного индуктивного сопротивления должна быть не менее 0.1 отн.ед., т.е. устанавливается ограничение на ударный ток короткого замыкания, в то время как для ударных турбогенераторов для получения максимального ударного тока короткого

замыкания сверхпереходное индуктивное сопротивление должно быть минимально возможным. По опыту проектирования и испытаний получена величина 0,033 отн.ед. Снижение индуктивных сопротивлений достигается за счет конструктивных решений, которые ведут к ухудшению условий охлаждения активной стали и меди. Поэтому ударные генераторы не рассчитаны на несение длительной нагрузки [2]. Ударный генератор типа ТИ-100-2 в испытательной лаборатории представлен на рис. 1.



Рис. 1. Ударный генератор ТИ-100-2 производства «Электросила»

III. МОЩНОСТЬ КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

При выборе источника тока короткого замыкания, обеспечивающего требуемые параметры режима испытаний оборудования, а именно ударного турбогенератора необходимо определить его номинальную мощность, т.е. мощность короткого замыкания. Мощность короткого замыкания определяется током короткого замыкания генератора через $\frac{1}{2}$ периода или через 10 мс при частоте тока 50 Гц. Это фактически является величиной сверхпереходного тока короткого замыкания, который обратно пропорционален сверхпереходному индуктивному сопротивлению x''_d . Кроме того, при расчете мощности короткого замыкания до момента его начала, должен быть определен базисный ток генератора при определенном номинальном напряжении на выводах. Для определения этого важного параметра вводится понятие модельной мощности ударного генератора. Ударный генератор определенной модельной мощности можно эквивалентировать турбогенератором, имеющим определенную активную мощность (равную полной, т.к. генератор считаем не

синхронизированным с сетью и не имеющим никаких потребителей, коэффициент мощности принимается равным единице), определенное номинальное напряжение, частоту вращения. Такой фиктивный генератор определяет не только электрические характеристики, но и массогабаритные, что позволяет мнимому турбогенератору принять физическую форму.

Таким образом, ударная мощность КЗ на зажимах генератора определяется (1)

$$P_y = P_M \frac{1}{x_d''}, \quad (1)$$

где P_y – ударная мощность КЗ, МВ·А; P_M – модельная мощность генератора, МВ·А; x_d'' – сверхпереходное индуктивное сопротивление, приведенное к модельной мощности, отн.ед. Зависимость мощности КЗ от сверхпереходного индуктивного сопротивления по продольной оси приведена на рис. 2.

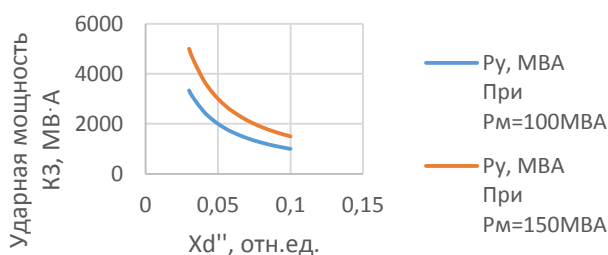


Рис. 2. Зависимость ударной мощности от сверхпереходного индуктивного сопротивления

Для испытаний электротехнического оборудования применяется такая характеристика как «мощность КЗ в испытательной камере», определяемая выражением:

$$P_{yu} = P_M \frac{1}{x_d'' + x_{iu}}, \quad (2)$$

где P_{yu} – мощность КЗ в испытательной камере, МВ·А; P_M – модельная мощность генератора, МВ·А; x_{iu} – индуктивное сопротивление сети между генератором и камерой, приведенное к модельной мощности генератора, отн.ед.

Модельная мощность ударного генератора определяет его основные массогабаритные характеристики и референтные значения номинального напряжения и тока статора, параметров возбуждения холостого хода. Относительно этих параметров проводится расчет режима работы, т.е. холостого хода, до перехода ударного генератора в режим внезапного КЗ, а также для расчетов ударных токов КЗ статора и возбуждения, исходя из расчетных кратностей данных параметров.

IV. КОМПЛЕКС УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Очевидно, что для выполнения испытаний электротехнического оборудования в динамических режимах требуется применение не только ударного турбогенератора, который, конечно, является основным элементом, но и другого оборудования и систем, обеспечивающих работоспособность генератора и вообще возможность функционирования испытательной лаборатории. В комплекс оборудования, который можно охарактеризовать как комплекс ударного генератора, входит вспомогательное оборудование и системы. Каждая система или единица оборудования выполняет свои функции, что в сумме позволяет всему комплексу удовлетворить потребности в испытательных режимах как по функциональности, так и по надежности протекания процесса испытаний и выработки необходимой мощности при коротких замыканиях.

Комплекс ударного генератора включает в себя:

1. Ударный турбогенератор.
2. Система возбуждения ударного турбогенератора.
3. Приводной двигатель с частотным преобразователем.
4. Система маслоснабжения опор агрегата «генератор-двигатель».
5. Система технологического контроля, управления и защит комплекса ударного генератора.

Функции, основные параметры ударных турбогенераторов описаны подробно в [6, 7]. Остальному оборудованию комплекса следует уделить внимание и описать роль каждой системы и единицы оборудования подробнее.

V. СИСТЕМА ВОЗБУЖДЕНИЯ УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Для обеспечения всех режимов работы ударного генератора применяется статическая тиристорная независимая система возбуждения с питанием силового преобразователя от собственных нужд. Функциональная схема системы возбуждения ударного генератора представлена на рис. 3. Система возбуждения обеспечивает следующие режимы работы ударных генераторов:

- холостой ход генератора перед циклами испытаний;
- форсировку возбуждения с заданной кратностью по напряжению и току при проведении испытаний (двухфазное, трехфазное короткое замыкание на выводах статора);
- ударное возбуждение;
- развозбуждение генератора после проведения испытания короткого замыкания;
- гашение поля в аварийных режимах.

Основные параметры системы возбуждения приведены в таблице 3.

Таблица 3

Основные параметры системы возбуждения

Максимальная кратность форсировки возбуждения по отношению к напряжению возбуждения генератора на холостом ходу, о.е.	14
Кратность форсировки возбуждения по току, о.е.	14
Длительность форсировки, с, не более	
в режиме однократного КЗ	0,30
в режимах повторных КЗ	0,15
Время развозбуждения от максимального положительного до наибольшего отрицательного напряжения возбуждения, с, не более	0,03

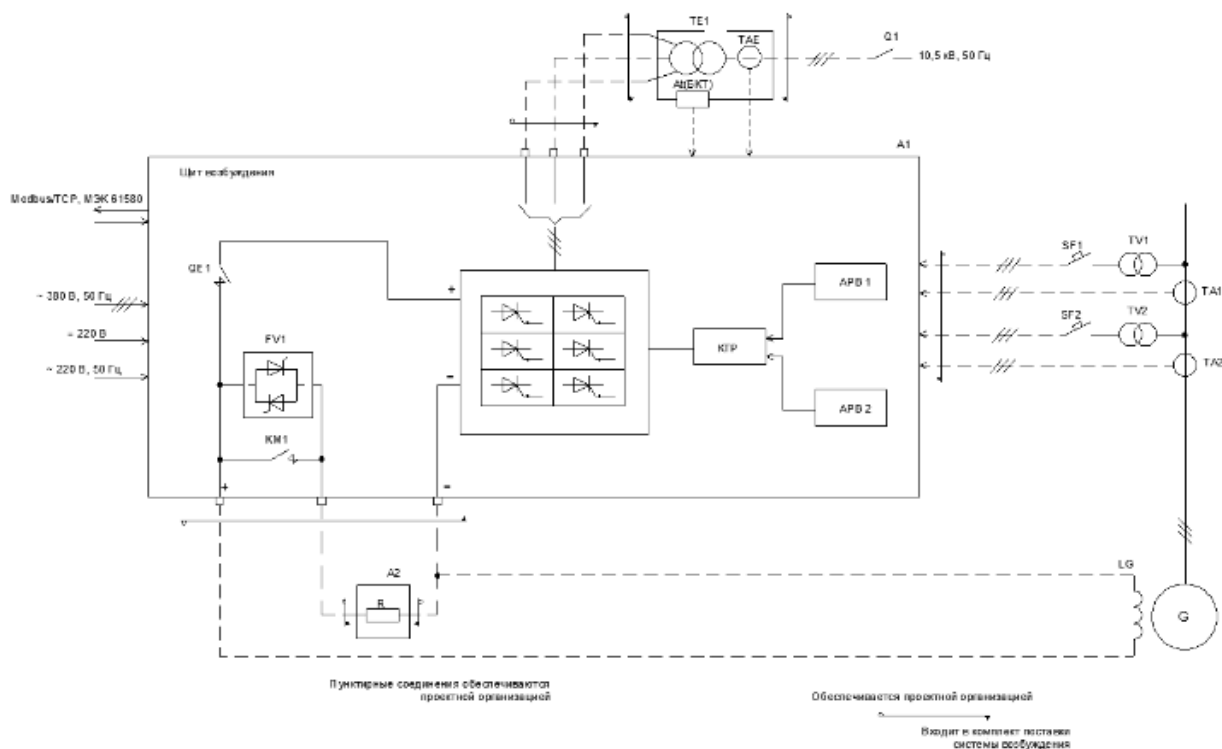


Рис. 3. Система тиристорная возбуждения ударного генератора

Система возбуждения выполнена по схеме независимого возбуждения при питании тиристорного преобразователя от трансформатора, подключенного к независимому источнику питания - ячейке собственных нужд 10,5 кВ. Предусмотрено два автономных и равноценных регулирующих канала. Каждый канал содержит цифровой автоматический регулятор возбуждения (АРВ) с системой импульсно - фазового управления. Любой из каналов способен самостоятельно обеспечить все заданные режимы работы ударного генератора. Один из каналов находится в действии, другой, резервный, - в состоянии готовности. В резервном канале импульсы управления заблокированы. В случае отказа рабочего канала по команде оператора в работу вводится резервный канал.

VI. ЧАСТОТНО-РЕГУЛИРУЕМЫЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Частотно регулируемый электропривод (ЧРП), состоящий из асинхронного электродвигателя и частотного преобразователя, предназначен для плавного разворота ударного генератора из неподвижного состояния до подсинхронной скорости вращения и поддержание данной частоты вращения в

течение требуемого для синхронизации времени. Функциональная схема электропривода представлена на рис. 4, однолинейная схема приведена на рис. 5. В начальный момент проведения эксперимента, ЧРП отключается и включается по окончании эксперимента для восстановления номинальной частоты вращения агрегата. В процессе останова, ЧРП участие не принимает. ЧРП также может применяться в качестве валоповоротного устройства.

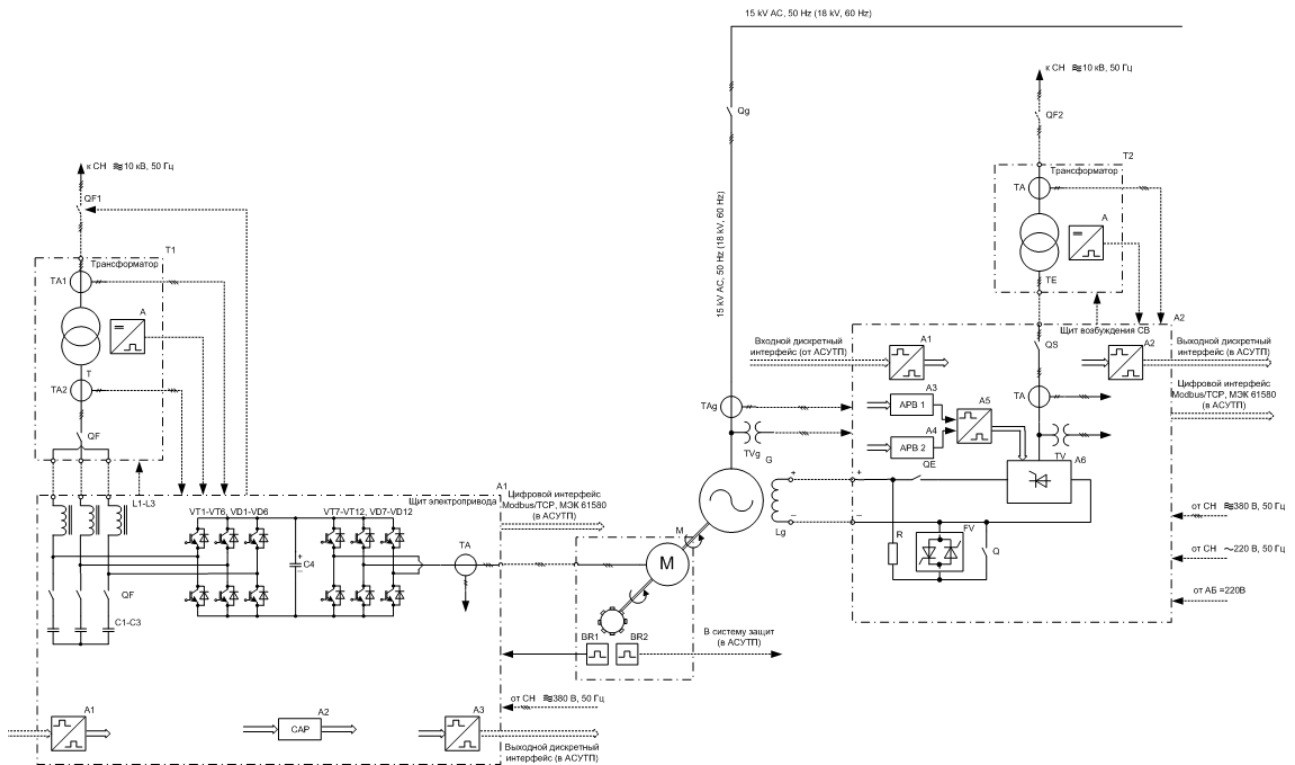


Рис. 4. Электропривод частотно-регулируемый и система возбуждения ударного генератора. Функциональная схема

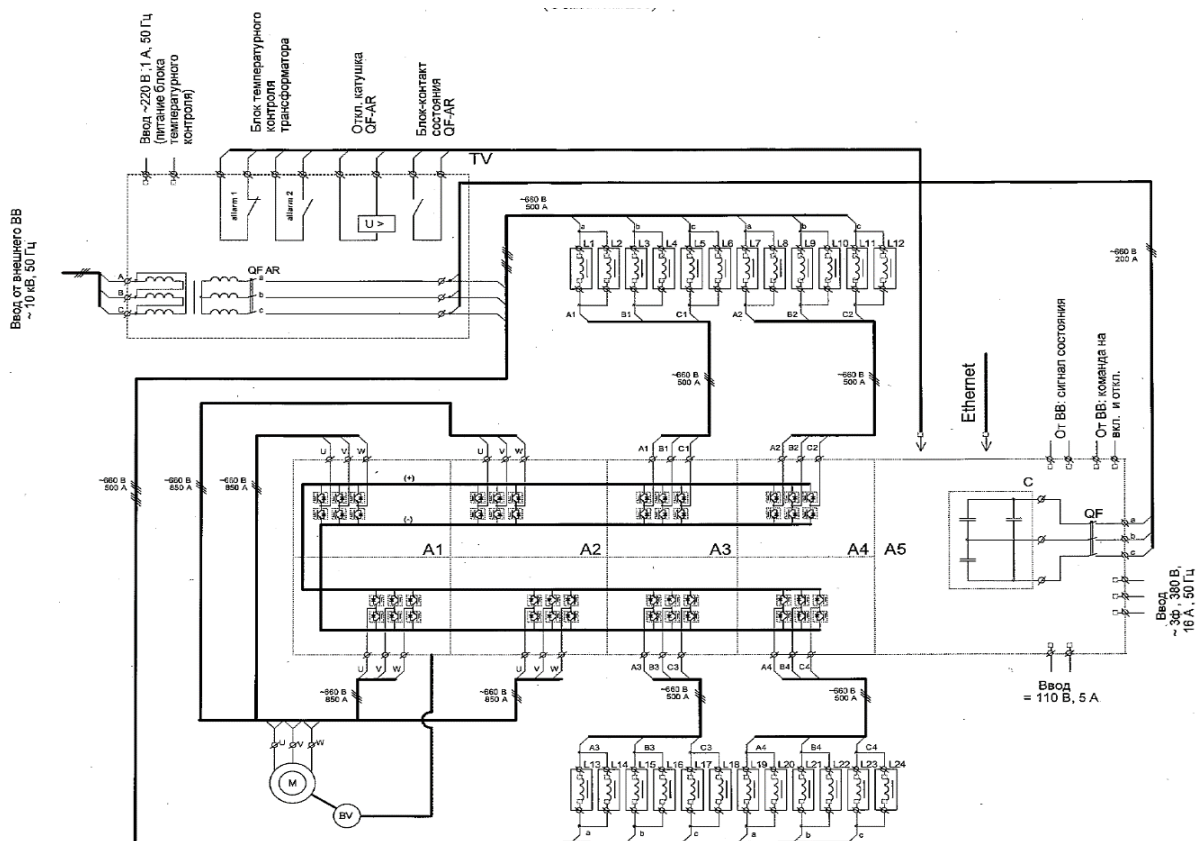


Рис. 5. Однолинейная силовая схема электропривода ударного генератора

VII. СИСТЕМА МАСЛОСНАБЖЕНИЯ ОПОР АГРЕГАТА

Для подачи масла в подшипники скольжения ударного генератора и приводного двигателя, применяются система маслоснабжения опор агрегата. Основными элементами системы являются электронасосные агрегаты (основной и резервный), маслобак, маслоохладитель для охлаждения подогретого масла и фильтры. В системе смазки допускается применение как минерального турбинного масла, например, ТП-22, или негорючей смазочной жидкости, например, ОМГИ. Для облегчения разгона агрегата в системе маслоснабжения применяется маслонасос высокого давления для обеспечения гидropодъема ротора агрегата. Гидроподъем также может применяться в период планово-предупредительных ремонтов для поворота ротора для целей осмотра и технического обслуживания.

VIII. СИСТЕМА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО КОНТРОЛЯ, УПРАВЛЕНИЯ И ЗАЩИТ КОМПЛЕКСА УДАРНОГО ГЕНЕРАТОРА

Все единицы оборудования, система маслоснабжения оснащаются контрольно-измерительными приборами, датчиками и измерительными преобразователями для контроля за тепловым и вибрационным состоянием оборудования в процессе эксплуатации, измерением электрических параметров входящего в комплекс оборудования (КИП). Сигналы с установленных КИП направляются в систему технологического контроля для, которая выполняет визуализацию теплового состояния оборудования, сигнализацию о выходе контролируемых параметров за допускаемые величины. В системе технологического контроля кроме того реализуются алгоритмы вычисляемых параметров режимов работы оборудования для целей диагностирования. Отдельные физические сигналы направляются в терминалы технологических и электрических защит, необходимых для защиты оборудования при нарушении нормальной эксплуатации либо в случае аварийных ситуаций как в оборудовании и системах комплекса ударного генератора, так и во внешних системах. Следует обратить внимание, что для системы электрических защит комплекса режим трехфазного короткого замыкания ударного генератора после получения сигнала о готовности к опыту и до окончания опыта, не является аварийным режимом и должна вводиться автоматическая блокировка срабатывание защитных реле. В остальных случаях, электрические защиты должны быть введены в работу.

Системам технологического контроля непосредственно связана с системой управления агрегатом, которая объединяет в себе все управляющие воздействия и обеспечивает автоматическое управление по заданному алгоритму оборудованием комплекса, вплоть до момента готовности к проведению испытаний в режимах короткого замыкания.

IX. Режимы работы ударных турбогенераторов в составе комплекса

Обеспечение необходимых эксплуатационных режимов осуществляется в первую очередь набором соответствующих параметров генераторов,

определяющих в итоге конструкцию изделия, его надежность в процессе жизненного цикла и, конечно, технико-экономические показатели. Выбор параметров начинается на стадии проектирования при выполнении электромагнитного расчета активного ядра турбогенератора, а именно, геометрии сердечника статора, куда входит геометрия зубцовой зоны, геометрия обмотки статора и выбор ее характеристик, величина воздушного зазора, а также геометрия бочки ротора, включая обмотку возбуждения с ее характеристическими параметрами [6, 7]. Как известно из опыта расчета и проектирования турбогенераторов [4, 5], параметры активной зоны определяют общие массогабаритные и технико-экономические показатели с учетом принятых при проектировании того или иного турбогенератора систем охлаждения и конструкционных материалов.

Ударные турбогенераторы являются специальными видами синхронных машин, поэтому набор основных параметров, определяющих их эффективность и обеспечение надежной работы, будет отличаться от набора параметров традиционных турбогенераторов.

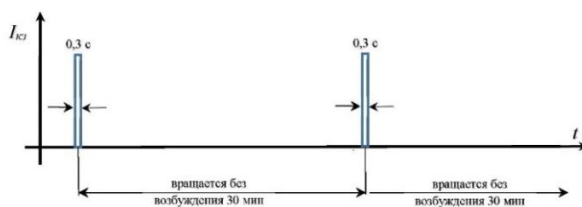
Основные режимы работы ударных генераторов для выполнения испытаний оборудования в специализированных испытательных центрах

1. Одно трехфазное КЗ при номинальном токе КЗ, продолжительностью 0,3 с (в соответствии с номинальной интегральной зависимостью $I_{kz2} \cdot 0,3$) и повторяемостью каждые 30 мин – см. рис. 6,а. В течение этого времени генератор должен работать в режиме ХХ без возбуждения при заданной частоте вращения.

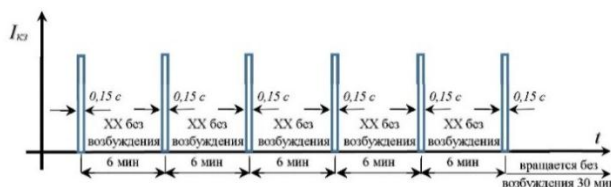
2. Шесть коротких замыканий, каждое продолжительностью 0,15 с, в течение 30 мин. Интервал между короткими замыканиями - 6 мин, в течение которых генератор должен восстановить заданную частоту вращения – см. рис. 6,б. В конце данного цикла испытаний последует охлаждение продолжительностью 30 мин, в течение которых генератор должен работать в режиме холостого хода без возбуждения при заданной частоте вращения.

3. Три двойных КЗ по следующему алгоритму: 0,15 с КЗ – пауза 0,3 с – 0,15 с КЗ. Интервал между циклами составляет 15 мин. В конце данного режима последует охлаждение продолжительностью 30 мин, в течение которых генератор должен работать в режиме ХХ без возбуждения при заданной частоте вращения (рис. 6,в).

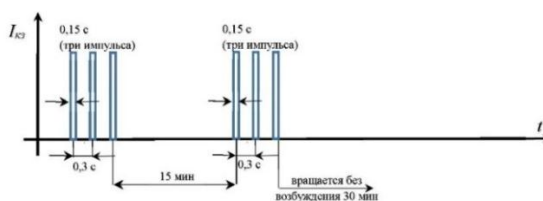
4. Одно КЗ продолжительностью до 4 с, повторяющееся каждые 30 мин, во время 30 минутной паузы генератор должен работать в режиме ХХ без возбуждения при заданной частоте вращения (рис. 6,г). В этом режиме среднеквадратичное значение тока статора должно быть ниже значения ударного симметричного тока КЗ и рассчитывается исходя из интегральной характеристики (I^2t), не превышающей номинальной ($I_{кз}^2 \cdot 0,3$).



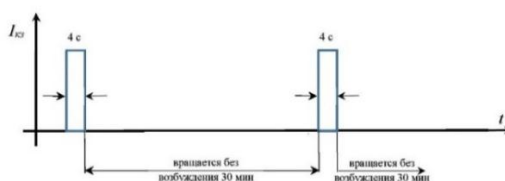
а



б



в



г

Рис. 6. Режимы работы ударного генератора

Х. ПАРАЛЛЕЛЬНАЯ РАБОТА УДАРНЫХ ГЕНЕРАТОРОВ И СИНХРОНИЗАЦИЯ

В процессе испытаний электротехнического оборудования большой мощности (мощные трансформаторы) на электродинамическую стойкость может появиться необходимость значительно увеличить мощность внезапного короткого замыкания, поэтому в крупных испытательных центрах, как правило, устанавливается несколько агрегатов ударных генераторов, имеющих возможность работать параллельно. В первую очередь параллельная работа ударных генераторов обеспечивается за счет максимально близких значений параметров каждого из генераторов, что достигается стабильностью технологического процесса при изготовлении оборудования, стабильными свойствами применяемых основных материалов и подтверждается заводскими испытаниями и испытаниями на месте установки. Но также кроме обеспечения стабильных параметров параллельно работающих генераторов необходимо решить сложную техническую задачу по синхронизации генераторов. Предлагается один из возможных вариантов синхронизации, при этом должно быть задействовано все оборудование комплекса ударного генератора и его вспомогательные системы:

1. Исходное состояние.

Генераторы не вращаются, системы возбуждения, электропривод готовы. Генераторные выключатели отключены.

2. Разгон генераторов до номинальной частоты вращения

После включения необходимого числа выключателей, автоматически назначается одна из систем автоматического регулирования (САР) ведущей, а остальные ведомыми. По команде оператора начинается частотно регулируемый плавный разгон с заданной интенсивностью до номинальной частоты вращения. При этом, ведущая САР контролирует не только собственную частоту вращения, но и контролирует частоты вращения остальных генераторов. По окончании переходных процессов, когда все ударные генераторы вращаются с одной частотой вращения, в АСУТП

формируется релейный сигнал о готовности электрооборудования к процессу возбуждения группы генераторов на холостом ходу.

3. Синхронизация группы генераторов.

По команде оператора ведущая САР продолжает работать в режиме поддержания частоты вращения собственного генератора, в то время как остальные САР (ведомые) других генераторов работают в режиме поддержания электромагнитного момента двигателя, величина которого задается или корректируется ведущей САР. Далее каждая система возбуждения осуществляет одновременное программное возбуждение генераторов, ограничивая (при необходимости) ток статора, который возникает в процессе втягивания в синхронизм. По окончанию переходных процессов все ударные генераторы вращаются синхронно с заданными величинами напряжения, частоты и фазы статора. Группа ударных генераторов готова к опыту внезапного короткого замыкания.

XI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. В статье приведено описание, основные функции оборудования комплекса ударного генератора, работающего в режимах коротких замыканий для испытаний электротехнического оборудования в лаборатории большой мощности испытательных центров.

2. Рассмотрены различные режимы работы ударного генератора в комплексе с вспомогательным оборудованием, определены условия выполнения эксперимента для обеспечения потребностей испытательной лаборатории, а также надежности оборудования комплекса ударного генератора.

3. Предложено описание алгоритма работы комплекса ударного генератора в случае необходимости выдачи мощного токового импульса посредством параллельной работы ударных генераторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. «Энергетическая стратегия Российской Федерации на период до 2035 года», 09 июня 2020, Москва, 92 с.
2. Воронцов А.И., Хуторецкий Г.М. Генераторы разрывной мощности на 2500 МВ·А. Сборник «Электросила», 1961, № 20.
3. Шилин Н.В. Научно-исследовательский центр по испытанию высоковольтной аппаратуры. – Электричество, 1967, № 9, с. 1–11.
4. Титов В.В. и др. Турбогенераторы. Расчет и конструкция. Л.: Энергия, 1967, 895 с.
5. Хуторецкий Г.М., Токов М.И., Толвинская Е.В. Проектирование турбогенераторов. Л.: Энергоатомиздат, 1987, 256 с.
6. Zheleznyak V.N., Korovkin N.V. Short-circuit turbogenerators: ways of short-circuit power increase for modern testing facilities operation. В сборнике: Proceedings of the 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering, ElConRus 2022. 2022, pp. 1307-1310.
7. Железняк В.Н., Коровкин Н.В. Повышение мощности ударных генераторов для обеспечения эксплуатационных режимов, «Электричество», 2022, №11, с. 46-55.
8. Пинчук Н.Д., Сокур П.В. Электрические машины для повышения надежности и устойчивости электрических сетей. - Сборник докладов научно-технической конференции "Актуальные вопросы и перспективы развития электромашиностроения", Москва, 3 декабря 2015, с. 83-89.
9. Федченко И.К. Техника высоких напряжений. Киев: Вища школа, 1969, 544 с.
10. Investing in Innovation S&C Electric Company's Advanced Technology Center. – Power Affiliates Program. 32nd annual review. May 20, 2011. University of Illinois At Urbana-Champaign. 84 p. <https://energy.ece.illinois.edu>.
11. ГОСТ ИЕС 60034-3-2015. Машины электрические вращающиеся. Часть 3. Специальные требования для синхронных генераторов, приводимых паровыми турбинами и турбинами на сжатом газе. М.: Стандартинформ, 2016, 20 с.

Захаров А. В.¹, Бедкер А. А.¹, Зайцев А. М.¹, Галдин А. Ю.²

¹ООО «Инжиниринговый центр «Русэлпром»

²ООО «Русэлпром испытательный центр»

АНАЛИЗ ОБЛАСТЕЙ ПРИМЕНЕНИЯ СИНХРОННО-РЕАКТИВНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ¹

Аннотация: Работа посвящена анализу применения синхронно-реактивных электродвигателей в приводах различных типов. Рассмотрены особенности применения машин этого типа в электроприводе вентиляторов и насосов. Обобщены результаты разработки и испытаний. Приведены данные моделирования прямого запуска синхронно-реактивного электродвигателя от сети на нагрузку вентиляторного типа. Показаны затруднения внедрения синхронно-реактивного электропривода, определены перспективные направления использования. Приведены данные сравнительного анализа синхронно-реактивных электродвигателей и асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором, предназначенных для использования в механизмах судового электропривода.

Ключевые слова: синхронно-реактивные электродвигатели, области применения, привод насосов и вентиляторов, судовой электропривод.

¹Работа финансировалась ООО «Концерн «Русэлпром».

I. ВВЕДЕНИЕ

В период 2010-2022 гг. ряд крупных зарубежных компаний ABB, Siemens и др. представили на рынке электроприводов переменного тока привод с синхронно-реактивными электродвигателями и сами электродвигатели [1]. Этот вид электрических машин и приводов был встречен с интересом отечественными и зарубежными специалистами. Были представлены машины, предназначенные для работы как в составе частотно-регулируемого электропривода, так и электродвигатели, способные запускаться от сети напрямую. Однако за истекший период существенного внедрения электропривода с синхронно-реактивными электродвигателями не произошло, что, вероятно, связано как с их особенностями, так и с отсутствием отечественного серийного производства таких машин.

В период 2015-2017 гг. специалисты Российского электротехнического концерна разработали и изготовили ряд синхронно-реактивных электродвигателей по заказам российских компаний и в инициативном порядке [2]. В таблице 1 приведены основные технические характеристики изготовленных электродвигателей.

Таблица 1

Перечень изготовленных синхронно-реактивных электродвигателей

Наименование	Основные характеристики			
	<i>Мощность, кВт</i>	<i>Частота вращения, об/мин</i>	<i>КПД</i>	<i>Коэффициент мощности</i>
СРД160S4	18,5	1500	92,6	0,76
СРДК160S4	18,5	1500	92,6	0,76
СРД160S6	15	1000	90,2	0,74
СРДК160S6	15	1000	90,0	0,73
СРД160M6	18,5	1000	92,9	0,75
СРДК160M6	18,5	1000	92,1	0,73
СРД315M6	110	1000	97,7	0,77
СРД540-6	500	1000	96,5	0,77

Были разработаны электродвигатели двух типов СРД – синхронные двигатели с ТЛА (*transversally laminated anisotropic*) конструкцией ротора и СРДК – синхронно реактивные электродвигатели с ТЛА ротором и успокоительной (пусковой) обмоткой ротора. Кроме того был изготовлен электродвигатель с АЛА (*axially laminated anisotropic*) конструкцией ротора, но он не прошел успешных испытаний [3]. Ротор АЛА типа не выдержал механической нагрузки. Были изготовлены электродвигатели СРД160М6 со скосом пазов ротора на одно зубцовое деление ротора, но эти конструкции были признаны бесперспективными из-за существенного снижения коэффициента мощности на 0,1 о.е [3].

На рис. 1 приведен эскиз ротора электродвигателя СРД315М6 и вид $\frac{1}{2}$ листа ротора, из которых он собран.

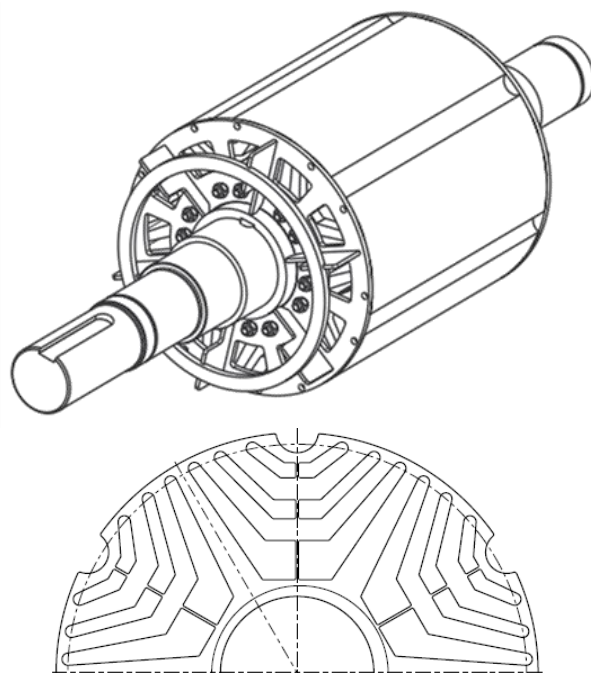


Рис. 1. Общий вид ротора ТЛА конструкции синхронно-реактивного двигателя и вид $\frac{1}{2}$ листа ротора

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

В ходе работы были проведены испытания преобразователей частоты ряда производителей с синхронно-реактивными электродвигателем 18.5 кВт без успокоительной обмотки. Основные результаты приведены в таблице 2.

Результаты испытаний электропривода
с синхронно-реактивными электродвигателями

Тип	Результаты испытаний				
	<i>ДПР</i>	<i>Настройка</i>	<i>Режим</i>	<i>Пуск</i>	<i>Коэффициент мощности</i>
KEB	+	СД	двигатель	2Мн	0,75
Unidrive	+	СД	двигатель	2Мн	0,75
Altivar		СД	двигатель генератор		0,55
ABB		СРД	двигатель генератор	2Мн	0,7
Danfoss		СРД	двигатель генератор	2Мн	0,6

В таблице приняты следующие обозначения: ДПР – использовался датчик положения ротора; настройка – тип электродвигателя, выбранный в программе управления преобразователя частоты (тип синхронный двигатель СД выбирался в случае отсутствия возможности выбрать управление синхронно-реактивным электродвигателем СРД); Мн – величина номинального момента. Из данных, приведенных таблице, видно, что отсутствие специализированной программы управления синхронно-реактивным электродвигателем не позволяет реализовать генераторный режим (торможение) машины. Кроме того следует отметить, что при бездатчиковом управлении на холостом ходу по обмотке электродвигателя протекал ток равный 60-70% от номинального.

Электродвигатели типа СРДК с успокоительной обмоткой не управлялись от преобразователей частоты в режимах СД и СРД. Настройка и запуск электродвигателя приводили к аварийной остановке с ошибкой работы, связанной с превышением ЭДС электродвигателя. При этом была выявлена возможность эксплуатации и регулирования частоты вращения таких электродвигателей с помощью скалярного вольт-частотного управления. Ток на холостом ходу в указанном режиме составил 40-60% от номинального тока.

На рис. 2 приведен общий вид электродвигателей СРД160S6 и СРДК160S6 с литой алюминиевой пусковой обмоткой. Передний щит демонтирован для понимания отличий конструкции ротора.

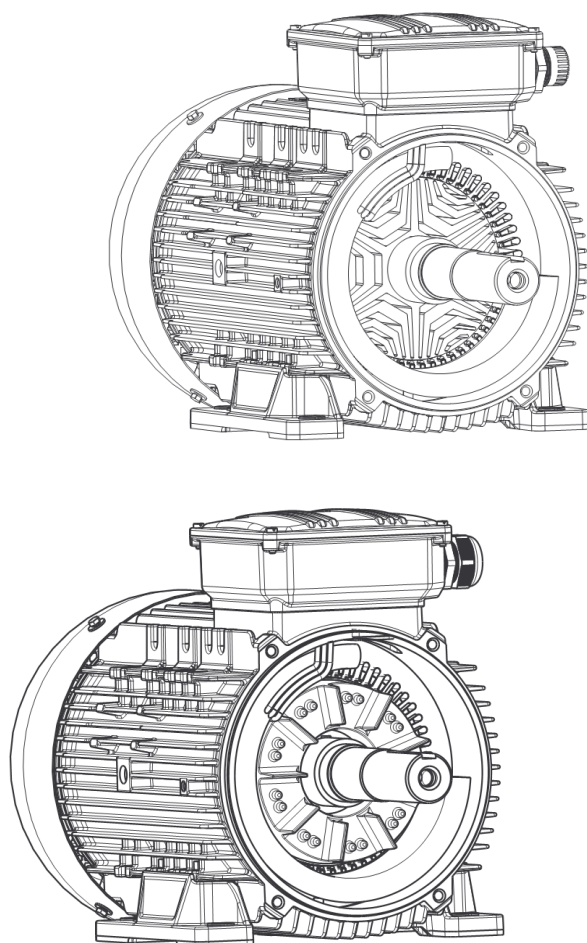


Рис. 2. Общий вид электродвигателя СРД160S6 (сверху)
и СРДК160S6 (снизу)

В качестве технического приложения электродвигателей типа СРДК с пусковой обмоткой предполагались привода вентиляторов и насосов, рассматривалось применение как регулируемого электропривода с вольт-частотным управлением, так и прямого электропривода с запуском от сети переменного тока 380В, 50Гц. В качестве компаний партнеров выступили ООО «ВИЛО РУС» (привод насосов) и ООО «ВЕЗА» (привод вентиляторов).

Испытания показали удовлетворительный запуск насосов от сети при напряжении не ниже 360В, т.е. 0,95% от номинального напряжения. Был замечен неудовлетворительный запуск центробежных вентиляторов, которые характеризуются высоким значением момента инерции рабочего колеса. В результате экспериментальных исследований и анализа данных моделирования был определен максимальный фактор инерции, характеризующий

отношения момента инерции механизма к моменту инерции электродвигателя, который ограничен величиной 10.

Временные диаграммы запуска электродвигателя СРДК160S4 от сети 380В, 50Гц на вентиляторную нагрузку 18,5 кВт с моментом инерции 1 кгм² и 1,21 кгм² приведены на рис.3, рис.4.

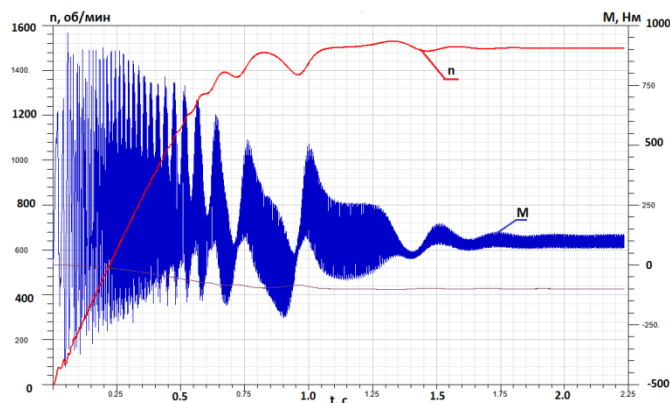


Рис. 3. Временная диаграмма запуска СРДК160S4 на вентиляторную нагрузку с инерцией 1 кгм²

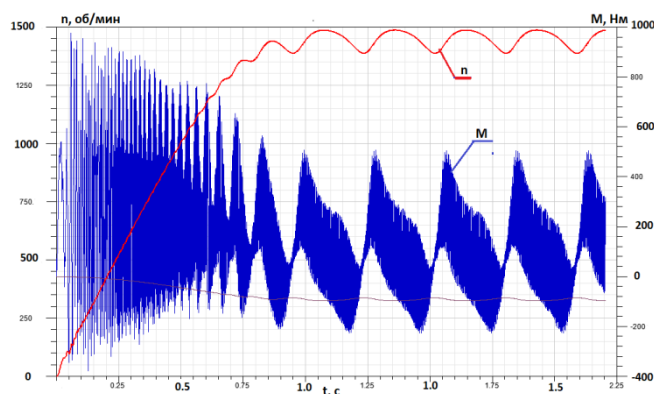


Рис. 4. Временная диаграмма запуска СРДК160S4 на вентиляторную нагрузку с инерцией 1,21 кгм²

Как видно из графиков, увеличение момента инерции механизма на 20% привело к неуспешному запуску электродвигателя от сети 380 В, 50 Гц. Частота вращения не достигла синхронной, что свидетельствует о появлении скольжения ротора, а, следовательно, возникновении потерь мощности в роторе. Снижение напряжения ниже номинального значения уменьшает величину максимально допустимого момента инерции механизма.

III. СУДОВОЙ ЭЛЕКТРОПРИВОД

Применение электроривода с синхронно-реактивными электродвигателями может иметь перспективы в судовом электроприводе [4]. В рамках анализа контракта, полученного от производителя судового оборудования из КНР, были проработаны варианты синхронно-реактивных электродвигателей для подруливающих устройств мощностью 500кВт и частотой вращения 400 об/мин. в водоохлаждаемой оболочке. Для анализа и оценки перспектив применения одновременно с синхронно-реактивными электродвигателями (СРД) проводилась разработка асинхронных машин (АЭД). Общий вид активной части и характерной картины магнитного поля указанных машин приведен на рис. 5–7.

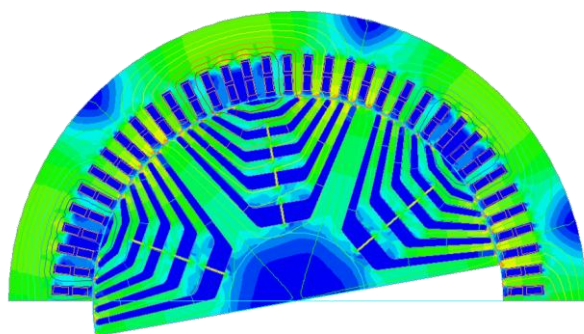


Рис. 5. Общий вид картины магнитного поля варианта синхронно-реактивного электродвигателя 500 кВт, 400 об/мин с внешним диаметром сердечника статора 850 мм, $2p=6$

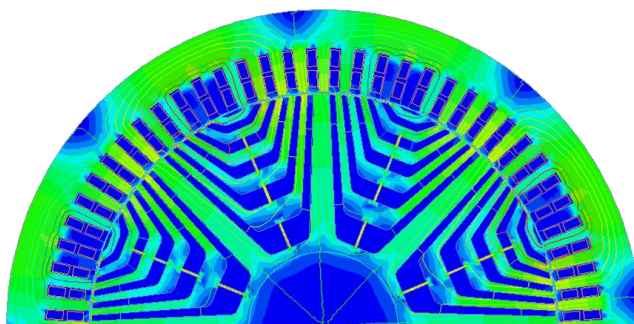


Рис. 6. Общий вид картины магнитного поля варианта синхронно-реактивного электродвигателя 500 кВт, 400 об/мин с внешним диаметром сердечника статора 850 мм, $2p=8$

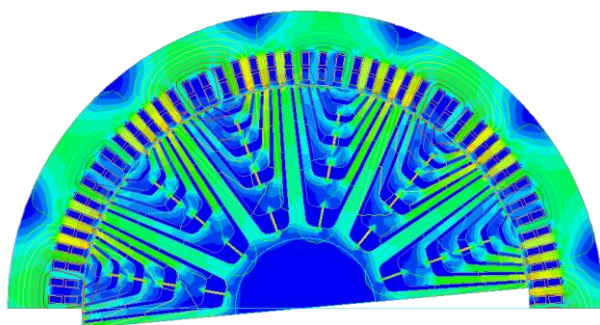


Рис. 7. Общий вид картины магнитного поля варианта синхронно-реактивного электродвигателя 500 кВт, 400 об/мин с внешним диаметром сердечника статора 850 мм, $2p=12$

Основные расчетные характеристики электродвигателей приведены в таблице 3. Разработанные электродвигатели имеют обмотку из жестких секций провода прямоугольного сечения, сердечник изготовлен из стали марки 2412.

Таблица 3

Основные характеристики

Тип	Da1=850, $\delta=1,8$, U=380В								
	$2p$	Di1	L	f, Гц	I, А	p_{CU1} , кВт	p_{CU2} , кВт	p_{FE} , кВт	КПД
СРД	6	605	750	20	1300	11,6	-	2,5	96,7
АЭД					900	10	5,3	3,9	95,7
СРД	8	630		27	1300	12,3	-	3,5	96,4
АЭД					927	10,6	4,6	5,3	95,5
СРД	12	640		40	1900	25,2	-	4,2	93,9
АЭД					1000	13,8	5,2	3,2	95

Обозначения $2p$ – число полюсов; Da1 – внешний диаметр сердечника статора; Di1 – внутренний диаметр сердечника статора; δ – величина воздушного зазора; L – длина сердечника; U – действующее значение напряжения; f – частота питающего напряжения; p_{CU1} , p_{CU2} , p_{FE} – потери мощности в обмотке статора, обмотке ротора, сердечнике, соответственно.

Основные расчетные характеристики электродвигателей приведены в таблице IV. Разработанные электродвигатели имеют всыпную обмотку из круглого провода. Сердечник изготовлен из стали марки 2212.

Основные характеристики

Тип	Da1=600, $\delta=0,8$, U=380В								
	$2p$	$Di1$	L	$f, Гц$	$I, А$	$p_{CU1},$ кВт	$p_{CU2},$ кВт	$p_{FE},$ кВт	КПД
СРД	6	425	2000	20	1100	15,1	-	4,2	95,9
АЭД					870	15,1	6,2	2,8	94,7

Анализ полученных характеристик не выявил существенных преимуществ у электропривода с синхронно-реактивными электродвигателями. Высокие токи статора в номинальном режиме, характерные для синхронно-реактивных электродвигателей, являются препятствием для их внедрения.

Анализ расчетных данных, приведенных в таблице, показывает, что наибольшие перспективы у синхронно-реактивных электродвигателей перед асинхронными двигателями с короткозамкнутым ротором при числе полюсов $2p=6$.

IV. ВЫВОДЫ

Синхронно-реактивные электродвигатели, бесспорно, обладают высоким КПД и могут быть интересны в электроприводе, требующем применять электрические машины с высоким классом энергетической эффективности IE3и выше.

Использование синхронно-реактивных электродвигателей с пусковой обмоткой из литого алюминия обеспечивает запуск электродвигателя, присоединенного к технологической машине с невысоким моментом инерции.

Синхронно-реактивные электродвигатели с пусковой обмоткой могут надежно регулироваться с помощью вольт-частотного способа и не требуют применения специализированных алгоритмов управления моментом и частотной вращения.

Для управления синхронно-реактивными электродвигателями без пусковой (успокоительной) обмотки требуются специальные алгоритмы особенно для управления частотой без датчика положения ротора.

На наш взгляд перспективы применения синхронно-реактивных электродвигателей взамен асинхронных на данный момент не очевидны, так как их применение требует использовать преобразователи частоты с существенно повышенным уровнем номинального тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Low voltage IE4 synchronous reluctance motor and drive package for pump and fan applications. ABB 9AKK105828 EN 06-2013. ABB Motors and Generators. 2013, 47 p
2. Zakharov A.V., Malafeev S.I., Dudulin A.L. "Synchronous reluctance motor: design and experimental research," in 2018 10th international conference on electrical power drive system, ICEPDS 2018- Conference Proceeding. 10.2018.
3. S.A. Zhuravlev, A.M. Zaitsev, A.V. Zakharov, "Development and research of synchronous reluctance electric motors characteristics". Proceedings of the XVI International Conference "Electromechanical, Electrotechnology, Electrotechnical Materials and Components", Moscow, "Znak", 2016, pp. 100 - 103
4. F.A. Gelver, N.V. Belousova, V.F. Samoseyko. The reactive electromechanical converter with anisotropic magnetic conductance of the rotor. Proceedings of the VIII international (XIX Russian) conference on the automatic electric drive. Vol. 1, pp. 394 - 398.

Крылова И. А., Кавалеров Б. В.
ПНИПУ

ИССЛЕДОВАНИЕ СПОСОБОВ УПРАВЛЕНИЯ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРОМ ДЛЯ СТАБИЛИЗАЦИИ ЧАСТОТЫ ВРАЩЕНИЯ ГАЗОТУРБИННОЙ УСТАНОВКИ

Аннотация: Рассматривается использование стартер-генератора газотурбинной установки для стабилизации ее частоты вращения. Газотурбинная установка используется для привода синхронного генератора в составе газотурбинной электростанции при выработке электроэнергии. Поэтому поддержание частоты вращения такой установки является важным для обеспечения требуемых показателей качества вырабатываемой электроэнергии, прежде всего по частоте тока электрогенератора. Для стабилизации частоты при резких изменениях нагрузки электрогенератора газотурбинной электростанции стартер-генератор должен вырабатывать или отбирать механическую мощность, поочередно работая в генераторном или двигательном режиме. В статье представлено исследование различных способов управления таким стартер-генератором для стабилизации частоты.

Ключевые слова: синхронный генератор, газотурбинная установка, система автоматического регулирования, стартер-генератор.

I. ВВЕДЕНИЕ

Газотурбинные установки (ГТУ) находят широкое применение для привода электрогенераторов с целью выработки электроэнергии. Примерами

таких установок могут являться ГТУ, которые создаются на базе конвертированных авиационных двигателей, или ГТУ, которые специально разрабатываются для этой цели. Среди последних – можно выделить такие установки, как использующие внешнюю камеру сгорания, что дает возможность использования различных видов топлива. Концептуальные научные исследования применения ГТУ в качестве привода электрогенерирующего оборудования ведутся в настоящее время предприятиями ТЭК, атомной, космической, судостроительной отраслей. В ведущих зарубежных странах – США, Японии, Германии, Франции, Южной Кореи, Китае и др., а также таких международных организациях как МАГАТЭ развернуты работы по созданию высокоэффективных энергетических установок, на базе подобных двигателей, использующих сжатый углекислый газ в качестве рабочего тела. Одними из ключевых задач, которые должны быть решены для обеспечения нормальной работы энергоустановки на базе ГТУ являются разработка, испытания и настройка систем автоматического управления (САУ) для обеспечения эффективного управления энергоустановками. Система автоматического управления должна обеспечить соответствие параметров качества генерируемой электроэнергии требованиям действующих нормативных документов.

Традиционные подходы к обеспечению стабилизации частоты вращения ГТУ за счет изменения расхода топлива в камеру сгорания в зависимости от рассогласования между заданным и измеренным значениями частоты вращения с формированием управляющего воздействия на исполнительный механизм подачи топлива в камеру сгорания с одновременным контролем или ограничением этого управляющего воздействия, а также контролем или ограничением прочих параметров, таких как температуры газов за турбиной, давления за компрессором и т.п. [1]-[5], оказываются недостаточно эффективными из-за запаздывания, вносимого в тракт управления инерционностями, связанными с двухвальной конструкцией конвертированных

авиационных ГТУ, или инерционностями теплообменных аппаратов ГТУ с внешними камерами сгорания.

Известен ряд изобретений, предназначенных для стабилизации частоты вращения вала турбокомпрессора. Для уменьшения восприимчивости турбокомпрессора к внешним возмущениям вал газотурбинной установки малой мощности оснащают дополнительно маховиком [6]. В [7] описано применение маховика (накопителя энергии, инерционного аккумулятора) для повышения эффективности функционирования газотурбинной установки за счет обеспечения заданных параметров вырабатываемой электроэнергии при резких изменениях ее потребления. В [8] также описано применение инерционного накопителя энергии для стабилизации частоты при изменении нагрузки. Помимо инерционных накопителей механической энергии применяют нагрузочные резисторы, тепловые аккумуляторы энергии. Перечисленные способы являются достаточно сложными в реализации, требуют дорогостоящего дополнительного оборудования, больших дополнительных объемов и существенных затрат.

Наиболее перспективным решением, в котором сочетаются возможности стабилизации частоты вращения при как при набросе, так и при сбросе нагрузки, быстроедействие, небольшие габариты – является электрическая машина, соединенная с валом ГТУ. В качестве такого двигателя может выступать электростартер ГТУ. Более того, электростартер, а также опционально преобразователь частоты уже могут входить в комплектацию энергоустановки на базе ГТУ.

В этом случае задача стабилизации частоты сводится к реализации расширенных функций управления ГТУ и электростартером. Исследование некоторых способов управления таким стартер-генератором ГТУ рассматривается далее.

II. СПОСОБЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРОМ

Основным инструментом для исследования способов и алгоритмов управления стартер-генератором является математическое моделирование [9]. Тем более, нередко во время проведения подобных исследований сама газотурбинная электростанция или ГТУ находятся в процессе проектирования.

В статье представлены результаты моделирования при использовании модели одновальной ГТУ [10,11], такая схема широко применяется в ГТУ с внешней камерой сгорания. В то же время в случае использования конвертированных авиационных ГТУ используется двухвальная схема [10,12].

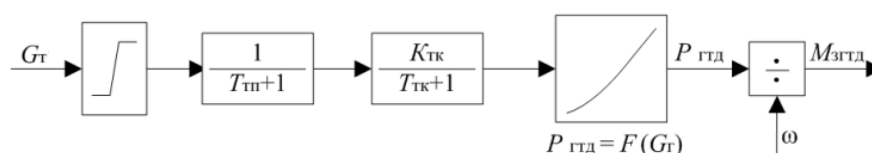


Рис. 1. Структурная схема модели ГТУ

На рис. 1 приняты следующие обозначения: G_T – расход топлива в камере сгорания (кг/с); T_{TP} – постоянная времени системы топливопитания (с); K_{TK} – коэффициент усиления турбокомпрессора; T_{TK} – постоянная времени системы подвода тепла (теплообменных аппаратов), а также турбокомпрессора (с); $P_{ГТД} = f(G_T)$ – зависимость выходной мощности ГТУ $P_{ГТД}$ (Вт) от расхода топливного газа G_T (кг/с); $M_{зГТД}$ – момент ГТУ (Нм); ω – угловая скорость вала турбокомпрессора (рад/с).

Модель ГТУ (рис. 1) позволяет без излишней детализации учесть основные влияющие инерционности, достаточные для проведения намеченных исследований. Конкретные параметры этой модели могут быть в дальнейшем идентифицированы по результатам экспериментов с реальной установкой, после ее изготовления и проведения испытаний. Выбор структуры модели осуществлялся, исходя из учета физических особенностей процессов преобразования энергии, имеющих место в подобных установках, а также опирался на уже существующие модели, например [13].

Модель стартер-генератора (синхронного электродвигателя) записана в осях d , q статора, модель системы управления синхронным двигателем показана на рис. 2.

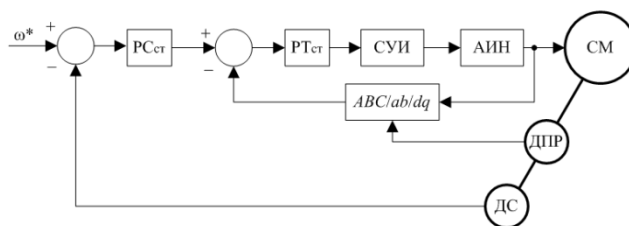


Рис. 2. Структурная схема системы управления синхронным двигателем

На рис. 2 обозначено: РСст – регулятор ЧВ стартера; РТст – регулятор тока стартера; СУИ – система управления импульсами инвертора; АИН – автономный инвертор напряжения; СМ – синхронная машина; ДПР – датчик положения ротора; ДС – датчик скорости; $ABC/\alpha\beta/dq$ – преобразователь координат.

Суть предлагаемого подхода состоит в том, что для стабилизации частоты вращения ГТУ в переходном режиме, когда контура управления САУ ГТУ работают в режиме сброса или набора мощности, предлагается включать электростартер в режиме поддержания частоты вращения, компенсируя при этом избыток или дефицит мощности на валу турбокомпрессора (1):

$$\Delta M = M_{\text{ГТУ}} \pm M_{\text{нагр}} \mp M_{\text{ст}} = J_{\Sigma} \cdot \frac{d\omega}{dt},$$

где ΔM – избыточный момент, Нм; $M_{\text{ГТУ}}$ – момент, развиваемый турбокомпрессором ГТУ, Нм; $M_{\text{нагр}}$ – момент нагрузки, Нм; $M_{\text{ст}}$ – момент электростартера, Нм; J_{Σ} – суммарный полярный момент инерции вращающихся механически связанных масс, кг/м²; ω – угловая скорость, рад/с.

Рассмотрим возможные способы включения электростартера в режиме поддержания частоты вращения ГТУ при набросе и сбросе нагрузки, а также варианты взаимодействия системы автоматического регулирования (САУ) электростартера с САУ ГТУ.

А. Релейное управление

Релейное кратковременное включение электростартера в режиме поддержания частоты вращения ГТУ во время наброса или сброса нагрузки(+100% / -100% мощности).

Укрупненная структурная схема показана на рис. 3: Электростартер релейно включается в режим поддержания ЧВ по сигналу с САУ ГТУ на некоторое время.

Рассматриваемый способ является наиболее простым с точки зрения реализации. Количество включений, период включений и длительность включения зависят от величины наброса или сброса нагрузки. Применение данного способа ограничено быстродействием контуров регулирования тока стартера с одной стороны, динамическими характеристиками канала измерения величины нагрузки на валу с другой стороны.

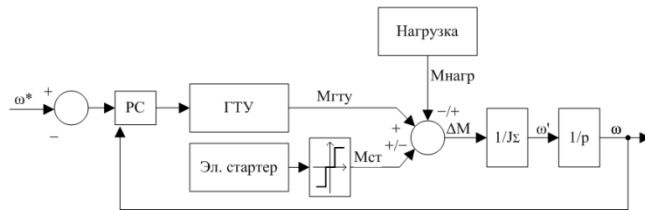


Рис. 3. Укрупненная структурная схема системы ГТУ-Сартер-Нагрузка (релейное включение электростартера в режиме поддержания частоты вращения): РС – регулятор угловой скорости ГТУ

В. Разомкнутое управление

Предложен вариант построения системы управления стартер-генератором по возмущению, укрупненная структурная схема которой приведена на рис. 4.

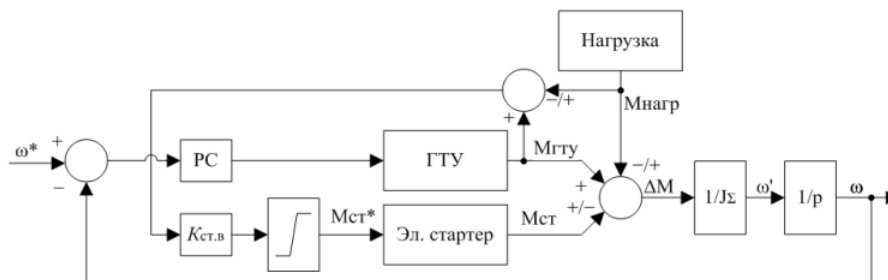


Рис. 4. Укрупненная структурная схема системы ГТУ-Сартер-Нагрузка (управление стартером в разомкнутом контуре скорости):
Kст.в – весовой коэффициент

Следует отметить, что возмущением в разомкнутом контуре ЧВ электростартера является разница моментов $M_{ГТУ}$ и $M_{нагр}$. Таким образом, заданием разомкнутого контура регулирования частоты вращения по возмущению является избыточный или недостающий момент ΔM на валу турбокомпрессора ГТУ.

Величину дефицита или избытка момента можно оценить косвенно, зная величину частоты вращения, укрупненная структурная схема будет иметь вид рис. 5.

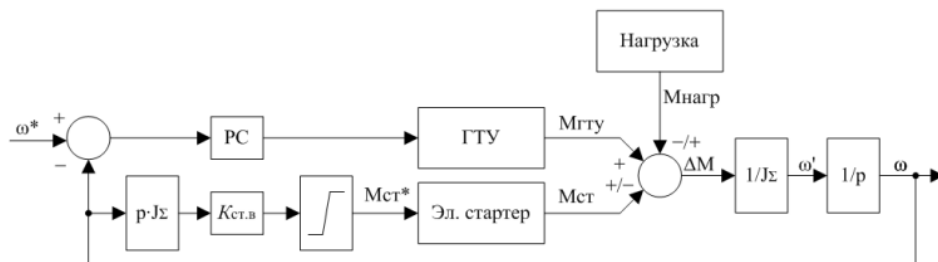


Рис. 5. Укрупненная структурная схема системы ГТУ-Сартер-Нагрузка (управление стартером в разомкнутом контуре скорости с наблюдателем ΔM), Набл. – наблюдатель ΔM

В данном случае результат компенсации избытка или дефицита момента зависит также напрямую от качества (величина запаздывания в тракте измерения, погрешность в тракте измерения) наблюдателя ΔM . Также результат компенсации дефицита или избытка момента зависит напрямую от настройки контуров тока по осям d , q электростартера. Поскольку мощность электростартера ограничена, то стабилизация частоты вращения при набросе и сбросе нагрузки наиболее эффективна при сбросе и набросе мощности в пределах максимальной мощности электростартера.

С. Управление в замкнутом контуре

Укрупненная структурная схема показана на рис. 6: регулятор скорости замкнутого контура электростартера настроен на модульный оптимум [14].

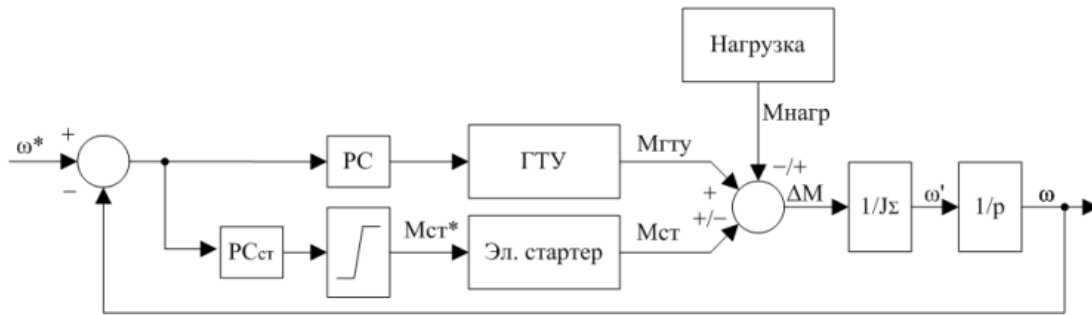


Рис. 6. Укрупненная структурная схема системы ГТУ-Сартер-Нагрузка (управление стартером по отклонению регулируемого параметра): РСст – регулятор частоты вращения электростартера

Поскольку быстродействие контура регулирования частоты вращения электростартера значительно выше чем быстродействие контура регулирования частоты вращения ГТУ при управлении электростартером в замкнутом контуре скорости при набросе и сбросе нагрузки, управляющее воздействие с выхода регулятора скорости САУ ГТУ не соответствует реальной величине изменения нагрузки. Таким образом, после выхода на номинальную частоту вращения САУ ГТУ не реагирует на ту часть избытка или дефицита мощности, которая была скомпенсирована за счет стартер-генератора. Это приводит к тому, что стартер остается в работе и после стабилизации частоты вращения.

По этой причине предложено и реализовано многосвязное комбинированное управления ГТУ по отклонению и возмущению.

Д. Многосвязное управление

Многосвязное комбинированное управления ГТУ по отклонению и возмущению (рис. 7) реализовано за счет введения в контур регулирования часты вращения САУ ГТУ корректирующей связи по моменту стартера $M_{ст}$, что способствует адекватной реакции САУ ГТУ на изменение нагрузки.

Для осуществления многосвязного комбинированного управления ГТУ по возмущению предложено осуществить взаимодействие САУ электростартера и САУ ГТУ согласно рис. 7 (а). Также связь по $M_{ст}$ может быть реализована непосредственно с выхода пропорционального регулятора стартера, как это показано на рис. 7 (б).

Следствием применения данного способа управления электростартером является дополнительное уменьшение отклонения ЧВ при набросе и сбросе нагрузки, а также существенное уменьшение времени работы электростартера в режиме стабилизации ЧВ, и как следствие заметное снижение потребляемой мощности стартера, что особенно важно при автономной работе установки на базе ГТУ в условиях отсутствия внешней электросети.

Для минимизации времени работы электростартера при автономной работе энергоустановки на базе ГТУ было предложено несколько способов управления электростартером и взаимодействия САУ ГТУ и САУ электростартера.

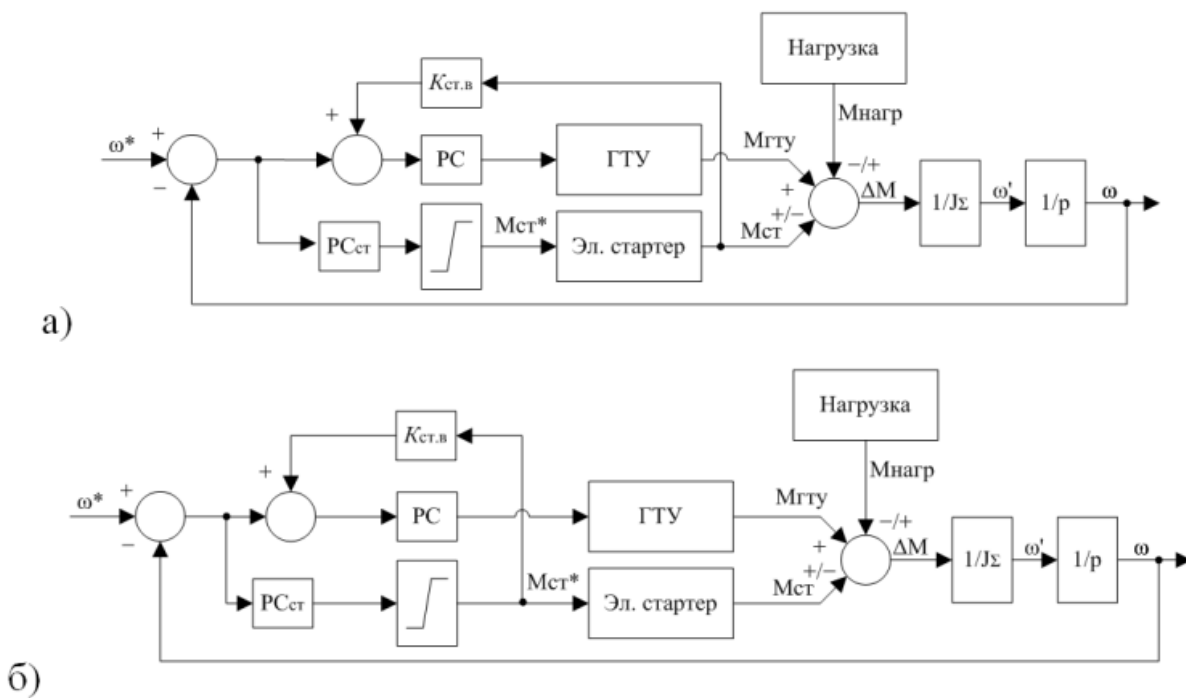


Рис. 7. Укрупненная структурная схема системы ГТУ-Сартер-Нагрузка (управление стартером в замкнутом контуре ЧВ)

Предложено дополнить контур управления частотой вращения САУ ГТУ корректирующей связью по возмущению. Такая коррекция заключается в том, что выход с P -составляющей регулятора частоты вращения САУ ГТУ корректируют по $M_{ст}$, как показано на рис. 8.

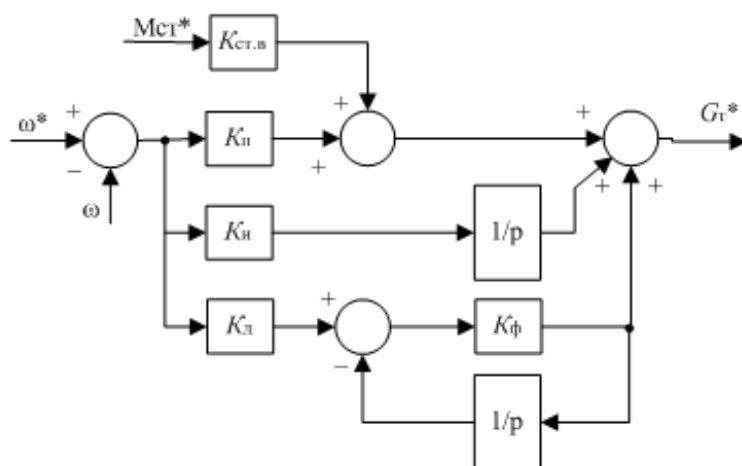


Рис. 8. Укрупненная структурная схема ПИД-регулятора частоты вращения ГТУ (K_p , K_i , K_f , K_d – коэффициенты пропорциональности, усиления интегратора, фильтра и дифференциальный соответственно)

Для каждого из способов получены и проанализированы переходные процессы, например, для последней схемы (рис.8) графики выглядят следующим образом (рис. 9).

На рис. 9. представлены графики переходных процессов по разности моментов $M_{згтд} - M_{нагр}$ (Нм), моменту электростартера $M_{ст}$ (Нм), расходу топлива в камере сгорания G_t (кг/с), расходу рабочего тела G_r (кг/с), угловой скорости ω (рад/с), току i_q (А) электростартера при сбросе и набросе 600кВт электрической нагрузки. Пунктирной линией показаны переходные процессы при применении только САУ ГТУ.

Е. Обсуждение результатов

Сравнение величины максимального отклонения, а также времени работы электростартера в режиме стабилизации частоты вращения при различных способах управления электростартером при набросе и сбросе нагрузки приведено в таблице 1.

Для гарантированного надежного вывода электростартера из режима поддержания частоты вращения (используемого в замкнутом контуре частоты вращения) по завершению стабилизации частоты вращения целесообразно выбрать оптимальную уставку по мощности или току стартера при которой необходимо производить его вывод из режима поддержания частоты вращения.

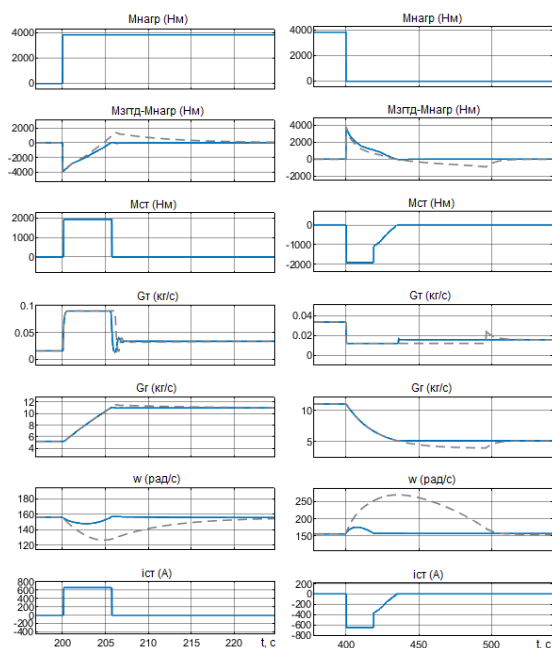


Рис. 9. Наброс на 200 с (а) и сброс на 400 с (б) нагрузки 600кВт

Следует отметить, что для стабилизации частоты вращения при незначительных по величине возмущениях целесообразно ввести уставку по минимальному уровню возмущения по потребляемой мощности, до которого нет необходимости вводить электростартер в режим стабилизации скорости при внешних возмущениях. Данное дополнение исключает излишние срабатывания электростартера при небольших возмущениях, при которых САУ ГТУ отработывает внешнее возмущение с допустимым отклонением регулируемого параметра. Следует отметить, что допустимые отклонения частоты вращения регламентированы действующими нормативными документами.

Таблица 1

Сравнение способов управления

Способ управления	Изменение нагрузки в 600 к Вт			
	Наброс		Сброс	
	Макс. откл. угл. скорости, рад/с	Время работы стартера, с	Макс. откл. угл. скорости, рад/с	Время работы стартера, с
Без электростартера	28	—	118	—
Схема рис. 3.	16	5	53	20
Схема рис. 5.	10	30	18	225
Схема рис. 7а	8	20	18	45
Схема рис. 8	8	6	18	35

III. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы с благодарностью отмечают вклад Корнилкова Николая Аркадьевича в представленном научном исследовании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Система регулирования частоты вращения ротора низкого давления газотурбинного двигателя: пат. 1066265 Рос. Федерация. № 3341622/06; заявл. 29.09.1981; опубл. 15.05.1994. 6 с.
2. Способ управления газотурбинным двигателем: пат. 2007599 Рос. Федерация. № 4752485/06; заявл. 23.10.1989; опубл. 02.15.1994. 8 с.
3. Способ управления газотурбинным двигателем: пат. 2351787 Рос. Федерация. № 2007107753/06; заявл. 01.03.2007; опубл. 10.09.2008, Бюл. № 10. 6 с
4. Способ управления газотурбинным двигателем и система для его осуществления: пат. 2490492 Рос. Федерация. № 2012104200/06; заявл. 07.02.2012; опубл. 20.08.2013, Бюл. № 23. 17 с.
5. Способ управления газотурбинным двигателем со свободной турбиной: пат. 2375598 Рос. Федерация. № 2008117538/06; заявл. 30.04.2018; опубл. 10.12.2009, Бюл. № 34. 6 с.
6. Евдачев, А.В. Газотурбинная установка малой энергетики // "XX Туполевские чтения": материалы междунар. молодежной науч. конф. Казань.:–2013. –С. 289 – 291.
7. Газотурбинная установка с накопителем энергии: пат. 120145 Рос. Федерация. № 2012150266; заявл. 16.11.2012; опубл. 10.09.2012, Бюл. № 25. 14 с.
8. Электрогенерирующая установка, снабженная средствами аккумулирования энергии, и способ управления такой установкой: пат. 2611725 Рос. Федерация. № 2011134426/06; заявл. 18.08.2011; опубл. 28.02.2017, Бюл. № 7. 25 с.
9. Веников В.А. Теория подобия и моделирования. Учебное пособие для вузов. 2-е изд., доп. и перераб., 1976. - 479 с.
10. Ольховский Г.Г. Энергетические газотурбинные установки. М.: Энергоатомиздат, 1985. – 303 с.
11. Методы оптимизации испытаний и моделирования систем управления газотурбинными двигателями / В.Т. Дедеш, В.М. Герман, В.Г. Августинovich и др.; под общей редакцией В.Т. Дедеша. – М.: Машиностроение, 1990. – 160 с.
12. Кавалеров Б.В., Ромодин А.В. Мини-электростанции на базе конвертированных авиационных двигателей: проблемы управления и испытания САУ ГТУ//Вестник Северо-Восточного федерального университета имени М.К. Амосова. – 2011. – Т. 8, №3. – С. 42–49.
13. Rowen W. I. Simplified mathematical representations of heavy-duty gas turbines // Journal of engineering for power. – 1983. – №105. –Р. 865–869.
14. Справочник по теории автоматического управления/ Под ред. А.А. Красовского. – М.: Наука. Гл. ред. физ.-мат. лит., 1987. – 712 с.

СЕМЕЙСТВО ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ЭНЕРГОСИСТЕМ НА ПЛАТФОРМЕ «МДЭСПК»¹

Аннотация: Представлена история создания в Пермском национальном исследовательском политехническом университете программных комплексов для моделирования электроэнергетических систем произвольной конфигурации. Рассматриваются особенности и функционал этих программных комплексов, а также основные задачи, которые они были призваны решать. Первоначально программные комплексы ориентировались на моделирование газотурбинных электростанций, создаваемых на базе авиационных двигателей в г. Перми. Потребность в их разработке диктовалась конверсионными программами, запущенными в начале 90-х годов прошлого века в авиадвигателестроительной отрасли. Полученный на этом этапе опыт позволил команде исследователей в дальнейшем перейти к созданию универсальных программных комплексов, которые позволяют моделировать статические и динамические режимы энергосистем произвольной конфигурации и состава структурных элементов. В результате была сформирована платформа «МДЭСПК», которая является базовой основой для создания различных программных комплексов для исследовательских, производственных и учебных целей. В программных продуктах представлены как традиционные классические модели элементов энергетических систем, так и нейросетевые модели.

Ключевые слова: энергосистема, компьютерное моделирование, программные комплексы, нейросетевые модели, поэлементные модели, газотурбинные электростанции.

1. ВВЕДЕНИЕ

Пермским авиадвигателестроительным комплексом разработаны и серийно выпускаются энергетические газотурбинные установки (ГТУ) различной мощности, от 2,5 до 25 МВт. Первая пермская энергетическая установка (ГТУ-2,5П мощностью 2,5 МВт) разработана в декабре 1994 года.

Для обеспечения надежной работы создаваемых на базе таких ГТУ газотурбинных электростанций потребовалась модель энергосистемы. Дело в том, что из-за взаимосвязи и взаимовлияния всех элементов энергосистемы наличия только модели электрогенератора, который приводится во вращение ГТУ – недостаточно. Генератор тут выступает как преобразователь энергии – механической в электрическую. Поэтому необходима модель сложной электроэнергетической системы, включающей синхронные генераторы, линии

¹Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ и Пермского края в рамках научного проекта № 19-48-590012.

связи, и другие элементы энергосистемы (трансформаторы, статические нагрузки и др.) Согласно принципу соответствия математическая модель такой сложной системы также должна быть сложной моделью, то есть состоять из моделей отдельных элементов и модели связи этих элементов между собой [1]. Кроме того, моделироваться совместно должны не только элементы энергосистемы, но и ГТУ. Реализация такой задачи предписывает разработчикам модели обладать знаниями в нескольких научных областях: газодинамике, механике, электромеханике, электроэнергетике и, конечно, в моделировании. Для такой комплексной модели требуется не только модель синхронного генератора (СГ) и ГТУ, но и ее электрической нагрузки, а также всей энергосистемы в целом. Все элементы энергосистемы влияют друг на друга и, следовательно, должны моделироваться вместе. Ведь энергосистема является сложным технологическим объектом (СТО) и характеризуется множеством взаимодействующих элементов, имеющих специфические свойства, такие как нелинейность, гетерогенность, стохастичность, неопределенность. Это усложняет задачу. И это заставило создавать специальные программные комплексы (ПК) для моделирования таких сложных систем.

В основу алгоритмического обеспечения программных комплексов было положено одновременное решение дифференциальных уравнений всех элементов энергосистемы, при этом напряжения узлов рассчитываются с помощью метода узловых потенциалов на каждом шаге расчета с использованием матрицы инцидентности. Матрица инцидентности отражает структуру энергосистемы [2] – [3].

Таким образом, в 2006 году в Пермском национальном исследовательском пол (ПНИПУ) был разработан первый программный комплекс «КМЭС» – для АО «ОДК-Авиадвигатель» [4] – [6]. Возможность моделировать параллельную работу нескольких газотурбинных электростанций (ГТЭС) на динамические и статические нагрузки это один из ключевых преимуществ использования данного ПК. Также к достоинствам ПК можно

отнести учет работы СГ в разных режимах: параллельно, автономно, с сетью бесконечной мощности. Достаточно широк состав элементов моделируемой газотурбинной электростанции (ГТЭС), которая состоит из отдельных взаимосвязанных элементов: ГТУ, СГ, система автоматического управления (САУ) ГТУ, САУ СГ. При этом недостатком использования ПК «КМЭС» является жесткая структура соединения основных и коммутационных элементов. Поэтому изменения в структурной схеме задавались за счет включения и отключения ключей (рис. 2, рис. 3). Сама схема электростанции включала шесть энергоблоков, трансформаторы, линии электропередачи, статические нагрузки, асинхронные и синхронные двигатели, сети бесконечной мощности и др.

От указанного недостатка был избавлен программно-моделирующий комплекс *PSS «Power System Supply»* – для предприятий ПАО «Лукойл» разработки ПНИПУ (кафедра микропроцессорных средств автоматизации). Этот комплекс позволял собирать любую структуру, однако считал только статику. Этот ПК использовал ту же алгоритмическую базу, но редуцированную для расчета только установившихся режимов [3].

После этого был разработан ПК «ЭлектроДин» – для ПАО «Протон-ПМ» (2010–2013) [7]. В этом ПК впервые были объединены возможности собирать произвольные схемы, а также моделировать и статику, и динамику (рис. 4, рис. 5).

Многолетний опыт разработки моделей СТО и программных продуктов позволил создать серию комплексов «МДЭСПК» (2014–2016) (Моделирование динамики электрических систем произвольной конфигурации). В эти комплексы дополнительно включены инструменты идентификации, оптимизации, построения нейросетевых моделей (ПК «НейроДин») и другие подсистемы. Вся сформированная платформа для создания различных ПК получила такое же название – «МДЭСПК» [8] – [9]. На ее основе формируются программные комплексы под конкретные задачи – исследовательские, образовательные, производственные. Пример – комплекс «EnergyDesc» [10].

Формирование принципов работы сложной системы, видов отказов и их последствий требует применения специальных аналитических методов, составляющих основу технологии модельно-ориентированного проектирования (МОП). С января 2022 года МОП обосновывается необходимостью использования цифровых двойников (ЦД) в соответствии с требованиями ГОСТ [11] – [13].

Использование ЦД в программных комплексах при разработке энергосистемы дает широкие возможности по разработке и испытаниям энергосистемы и ее составных элементов [14] – [16], а также систем управления во всей совокупности основных режимов работы рассматриваемых объектов. Это в значительной степени снижает трудоемкость и временные затраты как разработки, так и испытаний, реализует диагностику и самодиагностику систем управления.

II. НЕОБХОДИМОСТЬ КОМПЛЕКСНЫХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ОБЪЕКТА

Целесообразность разработки комплексных моделей СТО подтверждается стандартом на ЦД (Таблица 1) [11]. В соответствии с этим ГОСТ определена необходимость использования при создании систем управления ЦД первого и третьего уровней для объектов управления, в частности ГТУ.

Таблица 1

Структура цифровых двойников ГОСТ Р57700.37-2021

Уровень цифрового двойника	Описание
1 уровень Проектирование (конструирование)	Поэлементная детализированная модель, учитывающая все элементы.
	Служит для подготовки конструкторской документации.
2 уровень Визуализация (3D_модели)	3D моделирование, используя конструкторскую документацию
3 уровень Сопровождение (упрощенная реализация)	Упрощенные версии цифровых двойников первого уровня для сопровождения эксплуатации и синтеза систем автоматического управления
	Создание «решающих правил» и дополнения базы цифровых двойников нейросетевыми моделями

На основе ЦД первого уровня (эту роль выполняют ПК семейства «МДЭСПК») необходимо разрабатывать ЦД третьего уровня, то есть создавать быстрорешаемые или быстросчетные модели, которые смогут функционировать в темпе реального процесса и использоваться для широкого круга задач. Например, таких как создание систем управления, тестирование, диагностика и сопровождение работы ГТУ. Эта задача возникает по той причине, что модель энергосистемы требует значительного времени на моделирование, что затрудняет настройку регуляторов в ходе модельного эксперимента и затрудняет решение других оптимизационных задач, где требуется большое число последовательных экспериментов.

При разработке общей концепции моделирования на основании рассмотрения типовой структуры энергосистемы (ЭС) (рис. 1) выявлены особенности функционирования таких объектов (СТО) [17] – [19]:

- 1) СТО состоят из большого числа взаимодействующих элементов;
- 2) элементы в таких объектах взаимно влияют друг на друга;
- 3) внутри каждого элемента происходят различные процессы с преобразованием разных типов энергии.

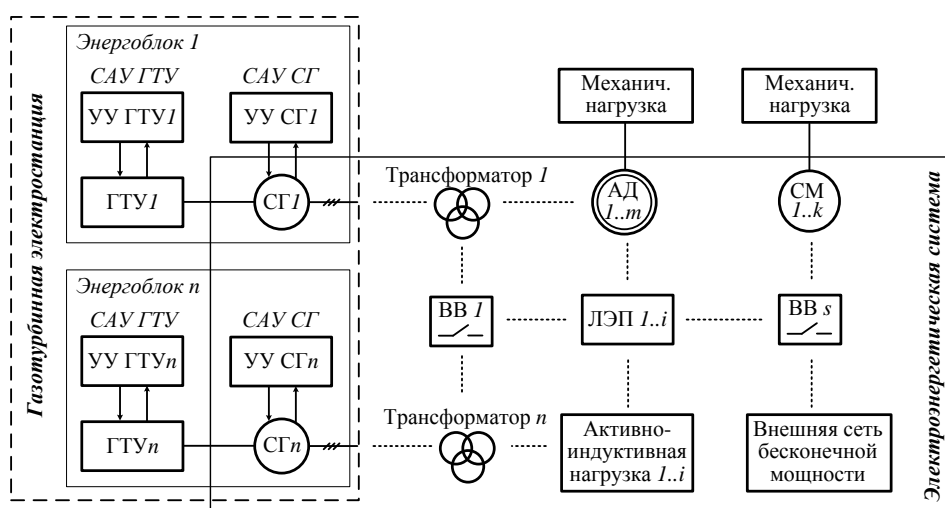


Рис. 1. Структурная схема СТО

Комплексная математическая модель СТО является «цифровым образом» проектируемого и/или реально функционирующего структурно-сложного

многорежимного объекта исследований. Основные особенности функционирования моделируемых элементов СТО и происходящих в них процессах:

- 1) нестационарность процессов (изменение параметров модели);
- 2) нелинейность характеристик модели объекта управления;
- 3) многосвязность моделируемой системы и необходимость использования аппарата многосвязных систем управления;
- 4) неработоспособность энергосистемы без САУ.

Такие комплексные математические модели должны быть выполнены в стандарте ЦД первого и третьего уровней [11]. Вышесказанное подтверждает необходимость использования МОП для исследования и разработки СТО. Такой подход подразумевает одновременную разработку самого объекта и его комплексной модели, учитывающей максимальное количество априорной информации, доступной разработчикам и экспертам.

Одним из вариантов применения МОП для разработки ЦД является разработка программных продуктов и последующее внедрение в них моделей СТО.

III. СЕМЕЙСТВО ПРОГРАММНЫХ КОМПЛЕКСОВ «МДЭСПК»

На кафедре электротехники и электромеханики (ЭТиЭМ) ПНИПУ развиваются, разрабатываются и введены в эксплуатацию программные продукты для моделирования сложных технологических систем. Рассмотрим некоторые из них.

А. Программно-моделирующий комплекс «КМЭС»

Программно-моделирующий комплекс (ПМК) «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети» «КМЭС» является программным комплексом, реализующим сложные поэлементные модели, которые позволяет моделировать динамику ГТУ, динамику синхронных генераторов, систем управления ГТУ, систем управления синхронных генераторов, внешнюю нагрузку сети, а также их совместную работу (рис. 2).

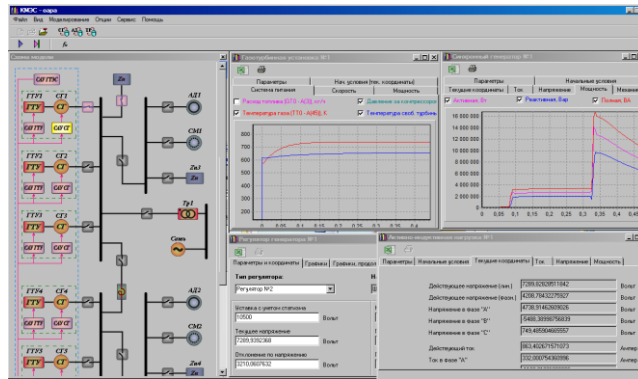


Рис. 2. Интерфейс программного комплекса КМЭС для испытания и настройки САУ ОАО «Авиадвигатель»

ПМК «КМЭС» позволяет проводить множество экспериментов во всех эксплуатационных режимах, получать экспериментальные данные, определять статические характеристики, а также тестировать САУ ГТУ и САУ СГ. ПМК «КМЭС» используется на АО «ОДК-Авиадвигатель» для тестирования и испытаний ГТУ и энергосистем, создаваемых на их основе (рис. 3).

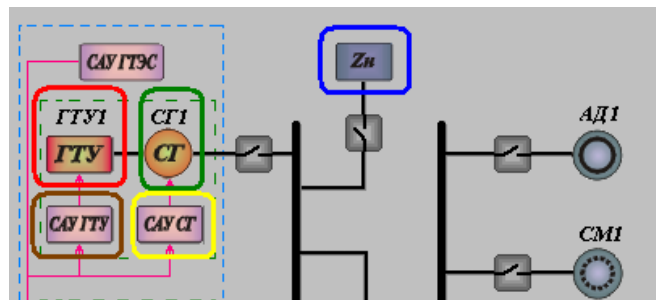


Рис. 3. Интерфейс схемы модели:
 выделено красным цветом – блок ГТУ, выделено зеленым цветом – блок СГ,
 выделено синим цветом – внешняя нагрузка сети, выделено коричневым цветом – САУ ГТУ, выделено желтым цветом – САУ СГ

В. Программно-моделирующий комплекс «ЭлектроДин»

ПМК «ЭлектроДин» является продолжением наработок и функционала и позволяет собирать (в отличие от ПК «КМЭС») сложные технологические схемы произвольной конфигурации (рис. 4 – 5). В отличие от ранее разработанного ПК PSS «Power System Supply» он позволяет моделировать не только статику, но и динамику сложных систем.

Первоначально ПК «ЭлектроДин» создавался для испытаний ГТУ и САУ ГТУ на полунатурных и натуральных испытательных стендах ПАО «Протон-ПМ» в соответствии с Постановлением Правительства РФ № 218 от 09.04.2010. Позднее в ПК были включены инструменты идентификации и оптимизации, и он послужил основой для формирования ПК следующего поколения.

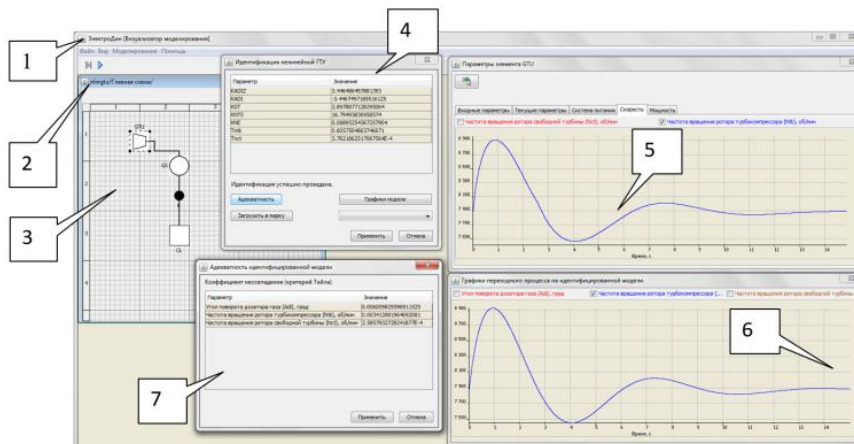


Рис. 4. Модуль идентификации в ПК «ЭлектроДин»:

- 1 – главное меню приложения «Визуализатор моделирования»,
- 2 – панель моделирования, 3 – окно отображения схемы проекта, 4 – главное меню модуля идентификации с коэффициентами модели, 5 – окно отображения результатов исходной модели, 6 – окно отображения результатов быстро решаемой модели, 7 – окно оценки адекватности модели



Рис. 5. Модуль настройки регуляторов в ПК «ЭлектроДин»:

- 1 – главное меню приложения «Визуализатор моделирования», 2 – панель моделирования, 3 – окно отображения схемы проекта, 4 – главное меню модуля настройки САУ ГТУ, 5 – окно отображения настроенных параметров САУ, 6 – окно отображения результатов до настройки, 7 – окно отображения результатов после настройки

С. Программно-моделирующий комплекс «МДЭСПК»

ПК «МДЭСПК» также, как и «ЭлектроДин» позволяет собирать сложные технологические схемы произвольной конфигурации. При этом в отличие от ПК «ЭлектроДин» – позволяет в более широкой степени моделировать объекты неэлектрической природы: тепловые процессы, газодинамические и др. «МДЭСПК» интегрирует разные инструменты: построение нейросетевых моделей, идентификация, оптимизация, автоматическая настройка регуляторов, алгоритмы адаптивного управления и др. На рис. 6 показана панель конструктора (формирователя расчетных схем) ПК «МДЭСПК».

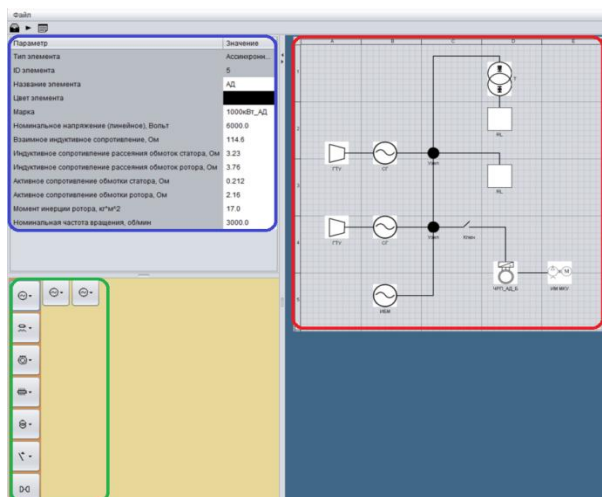


Рис. 6. Конструктор ПК «МДЭСПК»: красным – панель сборки технологической схемы; зеленым – панель готовых элементов схемы; синим – паспортные данные элементов схемы

На рис. 7 показан пример сложной технологической схемы, собранной из готового набора модулей.

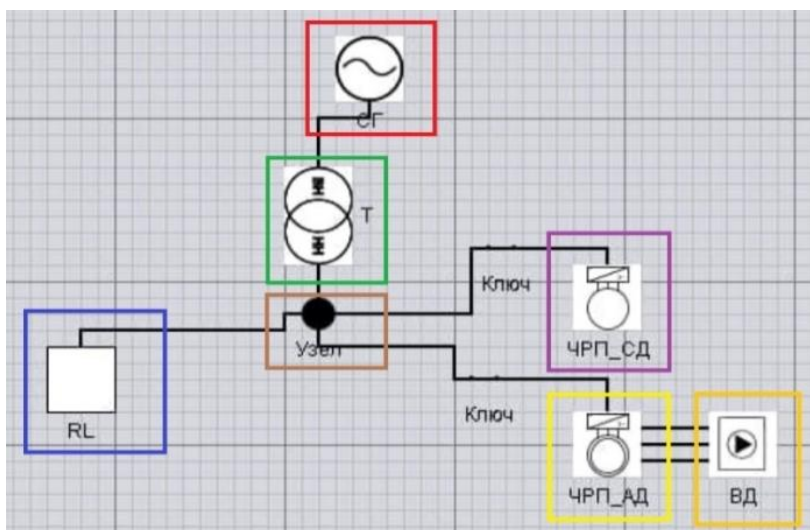


Рис. 7. Пример сложной технологической схемы:
 красным – синхронный генератор; зеленым – трансформатор; синим – активно-индуктивная нагрузка; фиолетовым – синхронный двигатель; коричневым – электрический узел; желтым – асинхронный двигатель; оранжевым – дутьевой вентилятор

На рис. 8 показана панель моделирования сложной технологической схемы, на эту же панель выводятся и графики переходных процессов.

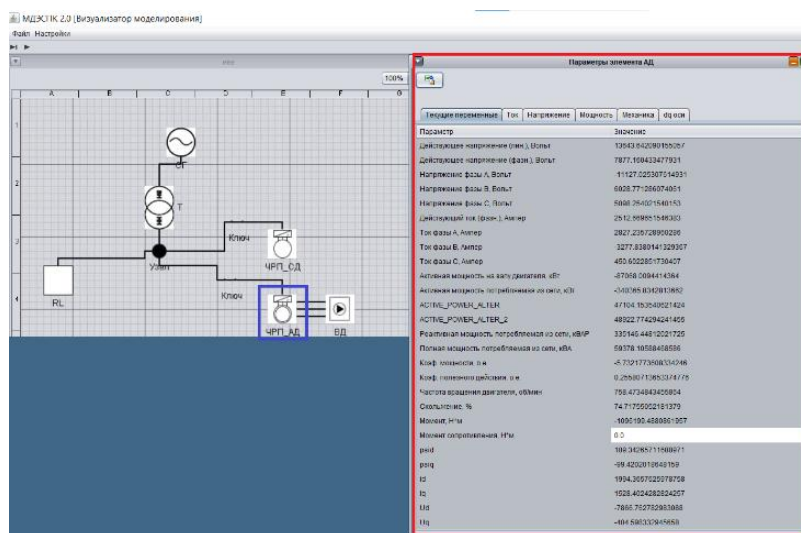


Рис. 8. Панель моделирования динамических процессов сложной технологической схемы:
 красным выделена панель отображения параметров и переменных асинхронного двигателя (выделен синим) при моделировании схемы

D. Программно-моделирующий комплекс «НейроДин»

ПК «НейроДин» входит в состав платформы «МДЭСПК» и служит для получения математических моделей энергосистемы на основе искусственных нейронных сетей (ИНС). Используется для настройки параметров регулятора газотурбинных установок и ГТЭС в ходе испытаний. ПК «НейроДин» состоит из нескольких модулей (рис. 9).

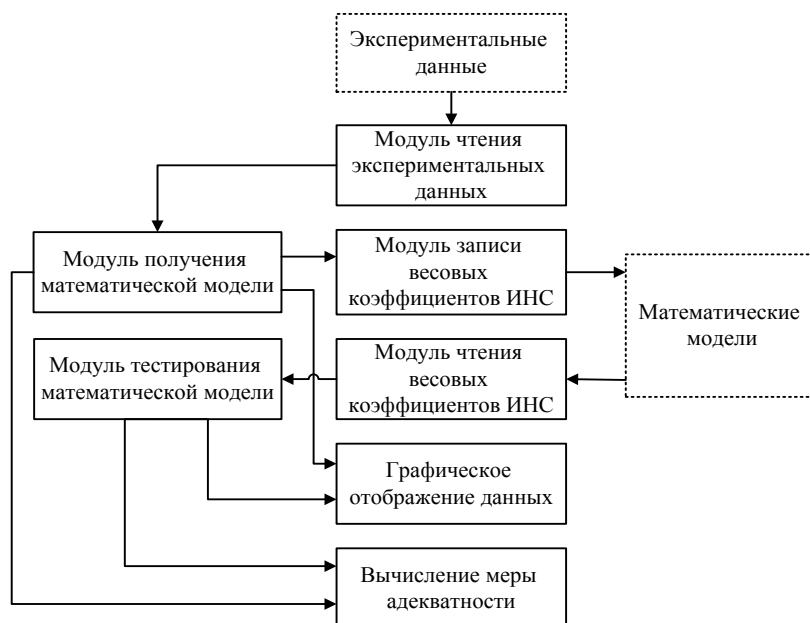


Рис. 9. Функциональная схема ПК «Нейродин»

С использованием ПК «НейроДин» на кафедре ЭТиЭМ были получены нейросетевые модели (НСМ) следующих характерных режимов и схем функционирования ГТЭС и энергосистемы:

1) НСМ параллельной работы двух ГТЭС различной мощности на выделенную нагрузку (рис. 10).

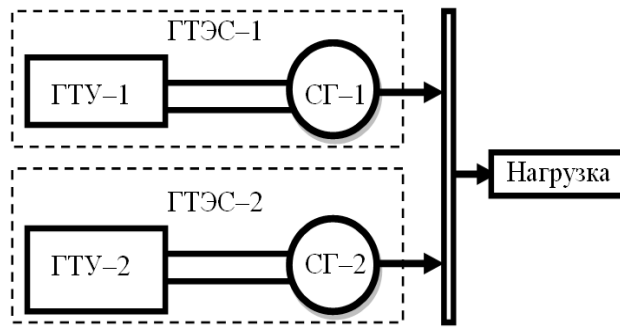


Рис. 10. Схема двух ГТЭС, параллельно работающих на выделенную нагрузку

На рис. 11 показано сравнение экспериментальных данных и данных НСМ, полученной с помощью ПК «НейроДин».

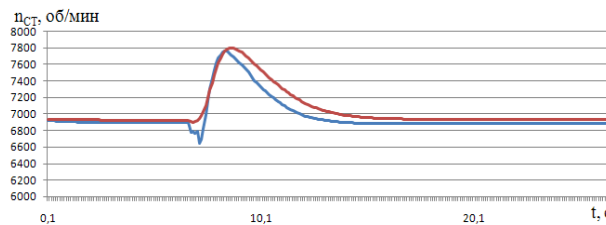


Рис. 11. Изменение частоты вращения свободной турбины одной из ГТУ при параллельной работе двух ГТЭС на нагрузку: красная – экспериментальные данные, синяя – модельные данные, САУ включена, мощность электрической нагрузки меняется с 6000 кВт до 1000 кВт

2) НСМ функционирования ГТЭС параллельно сети бесконечной мощности (рис. 12).

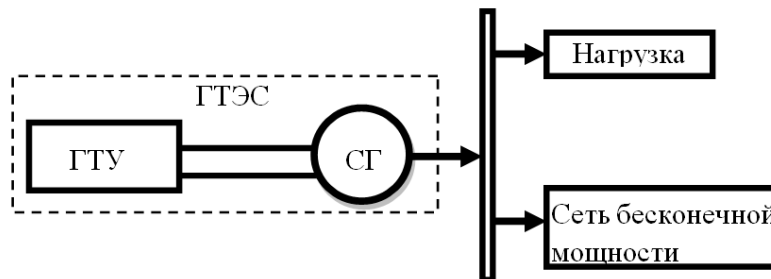


Рис. 12. Схема ГТЭС работающей на выделенную нагрузку параллельно сети бесконечной мощности

На рис. 13 показано сравнение экспериментальных данных и данных НСМ, полученной с помощью ПК «НейроДин».

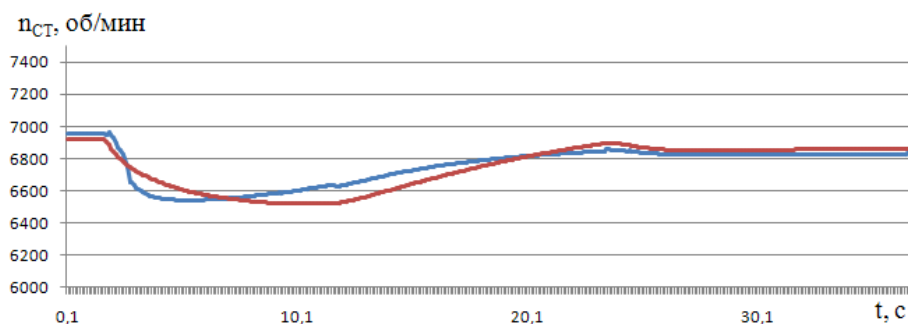


Рис. 13. Изменение скорости вращения свободной турбины ГТУ при работе ГТЭС параллельно сети бесконечной мощности: красная – экспериментальные данные, синяя – модельные данные, САУ включена, мощность электрической нагрузки меняется с 1000 кВт до 2000 кВт

3) НСМ функционирования автономной ГТЭС, учитывающей внезапный сброс и наброс активно-индуктивной нагрузки (рис. 14).

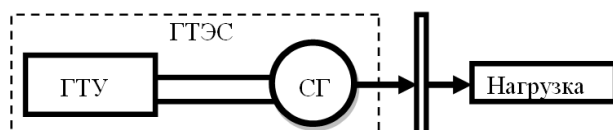


Рис. 14. Схема ГТЭС работающей на выделенную нагрузку

На рис. 15 показано сравнение экспериментальных данных и данных НСМ, полученной с помощью ПК «НейроДин».

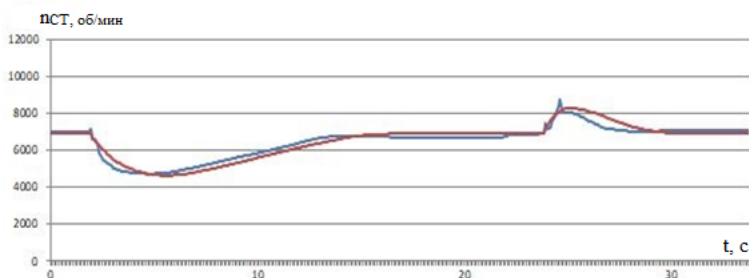


Рис. 15. Изменение скорости вращения свободной турбины в замкнутом контуре при сбросе и набросе мощности активно-индуктивной нагрузки: красная – экспериментальная, синяя – модельная, САУ включена, мощность электрической нагрузки меняется с 1000 кВт до 6000 кВт и снова на 1000 кВт

Е. Математическое и алгоритмическое обеспечения

В основу математического обеспечения платформы «МДЭСПК» положено раздельное решение дифференциальных уравнений отдельных элементов с явным интегрированием [20]. К преимуществам данного подхода отмечаются гибкость и простота программной реализации, надежность и робастность, а главный недостаток – склонность к неустойчивости численных процедур. Имеющийся у коллектива разработчиков опыт создания программных комплексов [2], [3] позволил повысить устойчивость алгоритмов расчета за счет применения способов искусственной стабилизации. Модели всех структурных элементов электрической системы моделируются в единой обобщенной векторно-матричной форме записи:

$$p\mathbf{I}_s = \pm\mathbf{A}\mathbf{U} - \mathbf{B}\mathbf{I} - \mathbf{H},$$

где \mathbf{I} – вектор токов элемента; $p\mathbf{I}_s$ – вектор производных внешних (статорных, для электрических машин) токов элемента; \mathbf{U} – вектор узлового напряжения, к которому подключен данный элемент; \mathbf{A} , \mathbf{B} – матрицы, размерность которых зависит от системы координат, в которых моделируется структурный элемент, а также от того полные это уравнения или упрощенные; \mathbf{H} – вектор, определяющий воздействие на элемент со стороны средств регулирования электрических параметров. Компоненты вектора \mathbf{H} для пассивных элементов электрической системы – нулевые, для синхронных машин при отсутствии регулирования возбуждения – постоянные, при наличии – меняются на каждом шаге расчета.

Решения этих уравнений дают приращения токов на каждом шаге расчета, причем токов внешних, посредством которых элемент взаимодействует с другими элементами системы. Узловые напряжения тоже определяются на каждом шаге расчета на основе допущения о неразрывности токов с использованием матриц инцидентности, задающих текущую структуру моделируемой электрической системы.

Модель взаимодействия элементов строится на основе метода узловых потенциалов. Такая структура математического и алгоритмического

обеспечений позволяет применить, так называемый, «модельно-независимый подход», когда внутреннее содержимое отдельных моделей структурных элементов электрической системы (синхронных и асинхронных машин, трансформаторов, линий электропередачи, статических нагрузок и др.) может быть модифицировано без изменения структуры всей многоэлементной модели. Главное состоит в том, чтобы эти модели имели те же выходы, что заданы принятой единой обобщенной формой записи моделей элементов. Таким образом, можно свободно заменить упрощенную модель на более сложную, нестационарную или нелинейную. По умолчанию в разработанных программных комплексах используются для моделирования структурных элементов нелинейные модели в виде систем дифференциальных уравнений, записанных в естественной фазной системе координат или в осях Парка-Горева с общепринятыми в теории электрических машин допущениями. Нелинейность этих моделей проявляется в произведениях переменных и в учете насыщения магнитных систем электрических машин.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В статье представлен опыт исследовательского коллектива разработчиков кафедры «Электротехники и электромеханики» в применении модельно ориентированного подхода в целях создания цифровых двойников для моделирования энергосистем и других сложных технических систем. Данный опыт реализован в целом ряде программных продуктов и последующем внедрении в их состав моделей сложных технологических объектов и дополнительных инструментов.

Исследования привели к созданию серии программных комплексов, в которых помимо возможности задавать произвольную схему конфигурации, возможности моделирования статики и динамики энергосистемы дополнительно включены инструменты идентификации, оптимизации, построения нейросетевых моделей (ПК «НейроДин»), автоматической настройки регуляторов САУ, адаптивного управления и др. Вся платформа

получила название – «МДЭСПК». На ее основе формируются программные комплексы под конкретные задачи – исследовательские, образовательные, производственные. Основная задача платформы «МДЭСПК» – увеличить возможности специалистов за счет объединения разных этапов разработки цифровых двойников сложных технических систем в одном программном комплексе. Использование разработанных программных комплексов позволяет, например, в отделе главного энергетика, повысить надежность систем электроснабжения за счет выбора оптимальной конфигурации системы и состава применяемого оборудования, обеспечивающих поддержание напряжения и частоты в системе в заданных границах в различных режимах. Последняя разработка в рамках этой платформы – ПК «EnergyDesc» выполнялась в рамках работ по гранту РФФИ № 19-48-590012 и нацелена на решение, в том числе, задач экологии за счет оптимизации сжигания топлива.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бусленко Н.П. Моделирование сложных систем. – М.: Наука, 1978. – 440 с.
2. Кавалеров Б.В., Казанцев В.П. Математическое моделирование электрической системы в задачах испытания и настройки средств управления газотурбинных энергетических установок// Электротехнические комплексы и системы управления. – 2011. – №1. – С. 2–8.
3. Кавалеров Б.В., Полулях А.И., Шигапов А.А., Лисовин И.Г. Программный моделирующий комплекс для испытания и настройки САУ ГТУ наземных электростанций//Вестник Московского авиационного института. – 2010. – Т. 17, №5. – С. 200–211.
4. Программный комплекс «Комплекс математических моделей электрогенератора и электросети» / А.Б. Петроченков, Б.В. Кавалеров, А.А. Шигапов, К.А. Один, А.И. Полулях, А.С. Ситников, И.Г. Лисовин, Е.Н. Ширинкина «КМЭС» /Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2011611839 РФ. / Дата регистрации 28.02.2011.
5. Кавалеров Б.В., Суслов А.И. Автоматизация испытаний систем управления конвертированными газотурбинными установками на основе применения математической модели электросистемы. Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Аэрокосмическая техника, №. 57, 2019, С. 105-117.
6. Килин Г.А., Кавалеров Б.В., Один К.А.. "Применение генетического алгоритма в задачах настройки и оптимизации систем управления газотурбинными установками" Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, №. 10, 2014, С. 7-19.
7. Петроченков А. Б., Кавалеров Б. В., Один К. А., Тарасов В. А., и Мусаева Ю. К. "Программный комплекс «ЭлектроДин» для автоматизации испытаний электроэнергетических газотурбинных установок" Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, №. 6, 2012, С. 257-261.
8. «Семейство программных комплексов моделирования и оптимизации электромеханических систем «МДЭСПК» [Электронный ресурс]. — 2022. — URL:

- <https://digital-natt.ru/offers/88cb00763473e487a09557691d44605caebe78a6/> (дата обращения 23.11.2022).
9. KavaleroV, B.V., Odin, K.A. A software package for modeling power systems of arbitrary configurations. Russ. Electr. Engin. 88, 310–313 (2017). <https://doi.org/10.3103/S1068371217050042>
 10. ПНИПУ: EnergyDesc Комплекс для разработки цифровых двойников сложных технических систем [Электронный ресурс]. — 2022. — URL: https://www.tadviser.ru/index.php/Продукт:ПНИПУ:_EnergyDesc_Комплекс_для_разработки_цифровых_двойников_сложных_технических_систем (дата обращения 23.11.2022).
 11. ГОСТ Р 57700.37–2021 Компьютерные модели и моделирование. Цифровые двойники изделий. Общие положения. — М.: Российский институт стандартизации, 2021. — 16 с.
 12. Tri-Lab Initiative Leads Innovation In Novel Hybrid Energy Systems [Электронный ресурс]. — 2020. — URL: <https://inl.gov/article/tri-lab-initiative-leads-innovation-in-novel-hybrid-energy-systems/> (дата обращения 27.11.2021).
 13. Цифровые двойники в машиностроении: Алексей Боровков выступил на круглом столе «Тенденции развития машиностроительного рынка в РФ в 2021» [Электронный ресурс]. — 2021. — URL: <https://fea.ru/news/7989> (дата обращения 29.11.2021).
 14. «Силовые машины» и Самарский университет им. Королева приступили к работам по созданию первой в России ГТУ на метано-водородном топливе [Электронный ресурс]. — 2021. — URL: https://ssau.ru/events_news/ref/24-kb-vodorod-sm (дата обращения 24.11.2021).
 15. Modelling Of The Gas-Turbine Colorless Distributed Combustion: An Application To Hydrogen Enriched – Kerosene Fuel [Электронный ресурс]. — 2021. — URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319921025416> (дата обращения 29.11.2021).
 16. HYFLEXPOWER: The World’s First Integrated Power-To-X-To-Power Hydrogen Gas Turbine Demonstrator [Электронный ресурс]. — 2020. — URL: <https://press.siemens.com/global/en/pressrelease/hyflexpower-worlds-first-integrated-power-x-power-hydrogen-gas-turbine-demonstrator> (дата обращения 29.11.2021).
 17. Olumayegun O. Wang M. Kelsall G. Closed-Cycle Gas Turbine For Power Generation: A State-Of-The-Art Review // Fuel.– 2016.– Vol 180. P. 694–717. ISSN: 0016-2361.
 18. Кудинов А. А. Горение органического топлива: учебное пособие. — М.: ИНФРА-М, 2021. — 390 с.
 19. Моляков В.Д. Куникеев Б.А. Троицкий Н.И. Эффективность замкнутых газотурбинных установок при различных способах и программах регулирования // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. — 2020. — № 3.— С. 51–63.
 20. Kundur P. Power system stability and control. New York, McGraw-Hill, 1994. — 1176 p.

ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

Аннотация: Описан подход к диагностике работоспособности электрических машин по внешнему электромагнитному полю. Обоснован бесконтактный метод выявления внутренних электромагнитных повреждений в электрических машинах на основе анализа возникающих при электромагнитных повреждениях несимметрий распределения магнитного поля. Установлены взаимосвязи внутренних повреждений в электрических машинах с характером распределений поля, корреляция изменений поля с видом и степенью повреждений, выявлены диагностические признаки повреждений. Спектральный анализ изменений временных и пространственных гармоник внешнего электромагнитного поля частотно-регулируемых электрических машин расширяет поле диагностических признаков повреждений электрических машин, возможности определения их технического состояния. На основе анализа изменений внешнего электромагнитного поля возможно создание эффективных систем оперативной бесконтактной диагностики и мониторинга электромагнитных повреждений в электрических машинах при их эксплуатации без установки диагностических датчиков оценки технического состояния внутри машин, предотвращения отказов машин.

Ключевые слова: электрические машины, электромагнитные повреждения, диагностика, бесконтактный метод, внешнее магнитное поле, несимметрия распределений поля, моделирование.

I. ВВЕДЕНИЕ

К электрическим машинам (ЭМ), особенно мощным синхронным генераторам (СГ) и двигателям (СД), трансформаторам, асинхронным двигателям (АД) и двигателям постоянного тока (ДПТ), предъявляются высокие требования по надежности работы. Повреждения таких ЭМ могут приводить к последующим отказам и авариями с тяжелыми последствиями и даже гибелью персонала, например, как при аварии на Саяно-Шушенской ГЭС. Годовой экономический ущерб от аварий турбогенераторов (ТГ) только одного из холдингов РАО ЕЭС достигает 1,5 млрд. руб., каждое отключение крупного СГ оценивается в среднем в 48 млн. руб., штраф за аварийное отключение СГ ТЗВ-800 за первый день аварии может составить 2,3 мил. руб. и до 1,7 мил. руб. за первые 4 часа аварии.

Отказы ЭМ могут быть обусловлены электромагнитными повреждениями их элементов: обмоток якоря (ОЯ) и возбуждения (ОВ), демпферной обмотки

(ДО): обрывы проводников, старение изоляции, пробой изоляции между фазами и на корпус, межвитковые замыкания, нарушения контактов и соединений; магнитопровода: нарушения межлистовой изоляции, выгорание пакетов стали и др. Более половины отказов ТГ мощностью 160–300 МВт возникают вследствие электромагнитных повреждений элементов. Электромагнитные повреждения вызывают нарушение электромагнитной симметрии в ЭМ, способны приводить к электрическому, магнитному, тепловому и механическому дисбалансу, вибрациям.

Диагностика внутренних электромагнитных повреждений ЭМ может осложняться комплексным проявлением сразу нескольких повреждений и их скрытыми причинно-следственными связями. Существует настоятельная потребность в достоверном прогнозировании технического состояния ЭМ, в своевременном выявлении электромагнитных повреждений. Системы диагностики ЭМ призваны своевременно выявлять развивающиеся повреждения, предотвращать наступление отказы ЭМ, сохранить их ремонтпригодность.

Установка диагностических датчиков электромагнитных повреждений внутри ЭМ конструктивно не всегда возможна и/или требует дополнительных тщательных согласований с производителями. Перспективно развитие внешних бесконтактных методов и систем диагностики внутренних электромагнитных повреждений ЭМ без внесения изменений в конструкцию ЭМ.

ЭМ при работе создают внешнее электромагнитное поле (ВЭМП), которое содержит в себе информацию о состоянии ЭМ, возможных электромагнитных повреждениях. ВЭМП могут регистрироваться бесконтактным, по отношению к ЭМ, способом датчиками, расположенными снаружи ЭМ (рис. 1), которые фиксируют сигналы ВЭМП, представляющее отголоски мультипликативного поля внутри ЭМ. Натурные эксперименты показывают, что индукции ВЭМП на корпусе ЭМ, даже с учетом его экранирования, значительно превышает индукцию магнитного поля Земли (30-50).10⁻⁶ Тл.

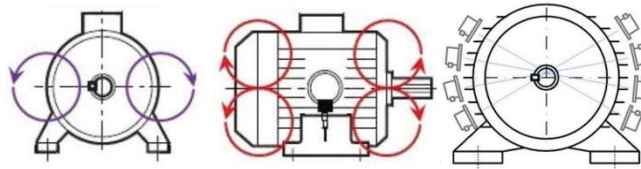


Рис. 1. Внешние магнитные поля ЭМ и датчики их регистрации

В ЭМ результирующее магнитное поле создается токами в обмотках и перераспределяется магнитопроводом, что отражается в распределении ВЭМП. В исправной ЭМ в симметричных режимах работы круговая диаграмма амплитуд магнитной напряженности ВЭМП однородна, симметрична с учетом временного характера изменения токов. Электромагнитные повреждения обмоток и/или элементов магнитопровода приводят к электрическим и магнитным несимметриям в распределении ВЭМП, изменению спектра временных и пространственных гармоник ВЭМП. При развитии электромагнитных повреждений чаще всего растут и амплитуды высших гармоник ВЭМП. Нелинейные искажения питающего напряжения, несимметричность нагрузки дополнительно искажают симметричность распределения ВЭМП.

Повышение эффективности систем неразрушающей бесконтактной диагностики ЭМ представляет актуальную научно-техническую задачу. Несимметрии распределения ВЭМП ЭМ могут быть использованы в этих системах как диагностический признак внутренних электромагнитных повреждений. При эксплуатации ЭМ возможен постоянный мониторинг ВЭМП для обнаружения зарождающихся электромагнитных повреждений разной степени развития.

В связи с этим актуально исследование и анализ ВЭМП при электромагнитных повреждениях ЭМ, возникающих несимметрий распределений ВЭМП, выявления диагностических признаков повреждений на ранней стадии развития. Это требует разработки уточненных моделей ВЭМП ЭМ с электромагнитными повреждениями, совершенствования методов математической обработки распределений ВЭМП, определения параметров

несимметрий и их анализа, формирования взаимосвязей повреждений ЭМ с несимметриями ВЭМП, определения вида и степени повреждений. Необходимы развитые алгоритмы и программы для автоматизации процессов диагностики. Целесообразно экспериментальное исследование ВЭМП при электромагнитных повреждениях ЭМ на основе физического моделирования и натурального эксперимента.

II. РАЗВИТИЕ ДИАГНОСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПО ВНЕШНЕМУ МАГНИТНОМУ ПОЛЮ

Значительный вклад в развитие методов анализа электромагнитных полей и выявления повреждений ЭМ внесли отечественные ученые: В.В. Домбровский, Г.Н. Тер-Газарян, И.А. Глебов, Я.Б. Данилевич, М.Б. Ройтгарц, В.И. Поляков, Кади-Оглы Е.Ф.; зарубежные ученые: D.R. Albright, J.W. Wood, R.T. Hindmarch и др. Однако применять анализ ВЭМП при диагностике электромагнитных повреждений в ЭМ предложено относительно недавно. Это научное направление развивается в УГАТУ, ИГЭУ, СамГТУ, МЭИ, СПбПУ, ЮРГУ, ИрГУПС, ОАО «Силовые машины» и других организациях.

Обоснование диагностики технических средств по структуре распределения их ВЭМП в общем виде представлено в [1] и [2], в частности для ЭМ [3]. Наиболее часто на основе анализа ВЭМП разрабатываются методы выявления электромагнитных повреждений в АД. Опубликовано достаточное количество работ и выполнено несколько диссертационных исследований и в этом направлении (Сотников В.В. [1]; Kokko V. [5]; Хайруллин И.Х., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Пашали Д.Ю., Бойкова О.А. [6], [7], [12]; Negrea M.D. [8]; Жумангулов К.К. [9]; Тонких В.Г. [10]; Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. [11]; Скоробогатов А.А., Новоселов Е.М. [13]; Бельский И.О. [14] и др.). Обосновывается возможность диагностирования межвиткового и межфазного замыкания, обрыв параллельной ветви обмотки, растрескивание и обрыв стержней ротора АД, статический эксцентриситет. Отмечается, что в АД ВЭМП излучается с поверхности статора в режиме холостого хода и с лобовых частей

обмотки статора в режиме пуска, меньше при номинальной нагрузке. В связи с этим диагностику повреждений обмоток эффективно проводить при больших токах обмоток, например, при пуске; повреждений магнитопровода – в режиме максимального насыщения, например, для АД в режиме ХХ.

Отмечается, что выраженность диагностических признаков повреждений в ВЭМП возрастает с повышением мощности ЭМ. С изменением мощности ЭМ изменяются амплитуды индукций ВЭМП, однако состав и характер гармонических составляющих остается тот же. Так при анализе ВЭМП ЭМ с межвитковым замыканием обмотки статора выявлено, что амплитуда 3 гармоники у неисправного ЭМ увеличилась в 10 раз по сравнению с исправным ЭМ, амплитуда 5 гармоники – более чем в 4 раза.

При диагностике работоспособности СМ анализ изменений ВЭМП применяется пока еще редко. Однако значимость определения повреждений СМ может быть высокой. В опубликованных работах и диссертациях Епремяна А.В. [15]; Ройтгарца М.Б. [16]; Yaghobi Н. [17]; Полищука В.И. [18]; Dos Santos Н.Ф. [19]; Irhoumah М. [20]; Казакова Ю.Б., Морозова А.Н. [21]-[23] эффективно применен метод определения электромагнитных повреждений СГ на основе анализа распределения ВЭМП.

Определение повреждений СГ может быть эффективно реализовано на основе спектрального анализа сигнала ВЭМП. Так реализован метод выявления диагностического признака виткового замыкания в ОВ в роторе СГ, основанный на обработке сигнала индукционного датчика ВЭМП. Метод основан на дифференциальном измерении двумя датчиками индукции ВЭМП, выделении субгармонической составляющей из однополярного сигнала датчиков, установленных в торцевой зоне. Обоснована зависимость между степенью несимметрии ВЭМП, вызванного витковым замыканием, и величиной сигнала датчика.

В экспериментальных исследованиях 8 полюсного СГ [24] индукционные датчики магнитного поля размещались на корпусе СГ. Метод диагностики неисправностей СГ по уровню сигнала датчика ВЭМП показал хорошую

чувствительность к степени повреждения ОВ. При закорачивании 50 % ОВ одного полюса на полупериод приходилось только 6 импульсов и изменялся спектр гармоник сигнала. Гармонический анализ сигналов при увеличении неисправности ОВ одного полюса показал, что амплитуды 2-й, 6-й и 10-й гармоник увеличиваются соответственно тяжести повреждения. Амплитуды 4-й и 8-й гармоник снижаются, но по сравнению с исправным состоянием ОВ их амплитуды больше. Выявлено, что при локальном замыкании листов статора сигнал датчика ВЭМП может увеличиться на 8 дБ. При совместных повреждениях ОВ и магнитопровода наибольшее изменение в сигнал датчика вносят локальные КЗ в листах статора.

Практически отсутствуют опубликованные работы по диагностике электромагнитных повреждений на основе анализа распределения их ВЭМП в трансформаторах.

Электромагнитное излучение ЭМ в виде ВЭМП действует в окружающем пространстве, вызывает электромагнитное загрязнение среды, оказывает влияние на оборудование и сотрудников. Плотность размещения и установленная мощность ЭМ возрастают, влияние ВЭМП ЭМ на работу других устройств усиливается. Возможно появление проблем электромагнитной совместимости при работе ЭМ с другими устройствами, возникновение нарушений в работе устройств автоматики, связи, сбоев в работе электронной техники, компьютерных сетях. Наиболее чувствительны к импульсным помехам микропроцессорные системы управления. Сбой интегральных микросхем может возникать уже при воздействии электромагнитных помех с энергией 10^{-7} , Дж. Проблема электромагнитной совместимости существенна для магниточувствительного оборудования летательных аппаратов, морских судов, другой подвижной техники, где в малом пространстве сконцентрировано электрооборудование и компьютерная техника. Уровень ВЭМП является показателем качества специальных «маломагнитных» ЭМ.

ВЭМП оказывают влияние на обслуживающий персонал, работу кардиостимуляторов. Наиболее чувствительны центральная нервная, сердечно-

сосудистая, гормональная и репродуктивная системы человека. Санитарными нормами установлены предельно допустимые уровни ВЭМП в зависимости от частоты. Так, при воздействии на человека в течение 8 часов предельно допустимая индукция постоянного магнитного поля составляет 104 мкТл, то для частоты 50 Гц она снижается до 100 мкТл, а для несущей частоты от 10-30 кГц, при которых часто работают преобразователи частоты (ПЧ), до 62,5 мкТл.

В целях снижения ВЭМП проведены диссертационные исследования и предложены способы снижения ВЭМП и диагностики повреждений частотно-регулируемых АД [25]-[27] (Казаков Ю.Б., Шумилов Е.А.), ДПТ [28] (Добродеев П.Н.).

Исследования ВЭМП ЭМ переменного тока если и проводятся, то обычно для случаев питания ЭМ синусоидальным напряжением. Распространенное питание ЭМ от ПЧ, особенно с применением широтно-импульсной модуляции (ШИМ) напряжения, с несинусоидальным выходным напряжением обуславливает появление ВЭМП широкого частотного спектра с разными по интенсивности энергиями гармоник электромагнитного поля. Каждая гармоника тока в обмотках статора и ротора ЭМ создает свою гармонику ВЭМП. Амплитуды некоторых гармоник токов могут достигать значительных величин. Изменения амплитуд и фаз высокочастотных гармоник ВЭМП, вызванные повреждениями внутренней структуры ЭМ, будут различающимися. Возможно применение частотно-фазового анализа ВЭМП частотно-регулируемых ЭМ, например, при фиксации высокочастотных гармоник ВЭМП на поверхности корпуса АД. Целесообразно развитие расчетных методик определения энергии помех ЭМ при несинусоидальном питающем напряжении.

III. МОДЕЛИ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН С ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМИ ПОВРЕЖДЕНИЯМИ

A. Математическое моделирование электрических машин с электромагнитными повреждениями

Математическое моделирование позволяет анализировать ВЭМП при электромагнитных повреждениях элементов конструкции ЭМ. Индуктивное сопротивление обмотки X зависит от угловой частоты ω , индуктивности L , магнитной проводимости λ и квадрата числа витков обмотки W . При закорачивании части витков и/или изменении λ индуктивные сопротивления обмоток изменяются

$$X \pm \Delta X = \omega(L \pm \Delta L) = \omega(\lambda \pm \Delta\lambda)(W - \Delta W)^2 .$$

Активное сопротивление обмотки R может возрасти, например, при обрыве параллельной ветви или ухудшении контакта и уменьшится при замыкании витков

$$R \pm \Delta R = \vartheta (l_{\text{пр}} - \Delta l_{\text{пр}}) / (s_{\text{пр}} - \Delta s_{\text{пр}}),$$

где ϑ – удельная электрическая проводимость материала провода, $l_{\text{пр}}$ $s_{\text{пр}}$ – длина и сечение провода исправной обмотки, $\Delta l_{\text{пр}}$ и $\Delta s_{\text{пр}}$ – изменения длины и сечения провода из-за повреждений обмотки.

При возникновении КЗ в n витках обмотки для сопротивления одного исправного витка z , сопротивлении ветви исправной обмотки $R = zW$, сопротивлении пути замыкания витков r , активное сопротивление ветви обмотки с учетом КЗ витков уменьшается на ΔR

$$R - \Delta R = zW \left[1 - \frac{n}{W} \left(1 + \frac{r}{zn+r} \right) \right] = KR .$$

Замыкание витков развивается не мгновенно, ΔR изменяется во времени, что может зафиксировано.

Работа СГ на мощную сеть при симметричности фазных напряжений и электромагнитных повреждениях элементов будет приводить к изменению токов обмоток ΔI , возможной их несимметричности, изменению потокосцеплений и параметров контуров. Режим может быть описан системой

модифицированных аналитических уравнений электрического равновесия напряжения фаз обмоток

$$\begin{cases} U_A = -(I_A \pm \Delta I_A)(R_A \pm \Delta R_A) - d(\psi_A \pm \Delta\psi_A)/dt \\ U_B = -(I_B \pm \Delta I_B)(R_B \pm \Delta R_B) - d(\psi_B \pm \Delta\psi_B)/dt \\ U_C = -(I_C \pm \Delta I_C)(R_C \pm \Delta R_C) - d(\psi_C \pm \Delta\psi_C)/dt \\ U_B = (I_B \pm \Delta I_B)(R_B \pm \Delta R_B) + d(\psi_B \pm \Delta\psi_B)/dt \end{cases} .$$

Здесь U_A , I_A , ψ_A – напряжение, ток и потокосцепление исправной фазы A ОЯ; аналогичные обозначения приняты для фаз B и C ; параметры ОВ имеют индекс v , t – время.

Вследствие повреждения обмоток и/или магнитопровода собственные L и взаимные M индуктивности фазы обмотки с другими контурами и потокосцепления могут измениться. Например, для фазы A

$$\begin{aligned} \psi_A \pm \Delta\psi_A = & (I_A \pm \Delta I_A)(L_A \pm \Delta L_A) + (I_B \pm \Delta I_B)(M_{AB} \pm \Delta M_{AB}) \\ & + (I_C \pm \Delta I_C)(M_{AC} \pm \Delta M_{AC}) + (I_B \pm \Delta I_B)(M_{AB} \pm \Delta M_{AB}) . \end{aligned}$$

Без учета насыщения и потерь в стали возможен переход к вращающейся вместе с ротором системе координат с осями d и q . Токи фаз при возникновении электромагнитных повреждений заменяются составляющими обобщенного тока якоря по продольной I_d и по поперечной I_q осям и током нулевой последовательности I_0

$$\begin{cases} I_d \pm \Delta I_d = \frac{2}{3} \left[(I_A \pm \Delta I_A) \cos \gamma + (I_B \pm \Delta I_B) \cos(\gamma - 120^\circ) \right. \\ \qquad \qquad \qquad \left. + (I_C \pm \Delta I_C) \cos(\gamma + 120^\circ) \right] \\ I_q \pm \Delta I_q = \frac{2}{3} \left[(I_A \pm \Delta I_A) \sin \gamma + (I_B \pm \Delta I_B) \sin(\gamma - 120^\circ) \right. \\ \qquad \qquad \qquad \left. + (I_C \pm \Delta I_C) \sin(\gamma + 120^\circ) \right] . \\ I_0 \pm \Delta I_0 = \frac{1}{3} [(I_A \pm \Delta I_A) + (I_B \pm \Delta I_B) + (I_C \pm \Delta I_C)] \end{cases}$$

Каждая составляющая тока создает намагничивающую силу (НС) и соответствующие магнитные потоки. При симметричной нагрузке исправной ЭМ $I_0 = 0$ и распределение ВЭМП симметрично относительно осей d и q . Изменения, вследствие электромагнитных повреждений, магнитных проводимостей, токов, возникающая электрическая и магнитная несимметрии будут вызывать появление I_0 , искажение распределения ВЭМП. Возникает

возможность выявления электромагнитных повреждений ЭМ на основе анализа распределения ВЭМП.

При питании ЭМ несинусоидальным напряжением возможно разложение формы напряжения на временные гармоники с использованием рядов Фурье

$$u(t) = \sum_{v=1}^{\infty} U_{Mv} \sin(v\omega t + \varphi_v) ,$$

где U_{Mv} – амплитуда v -й гармоники напряжения, f_1 – частота 1 гармоники, $\omega = 2\pi f_1$ – угловая частота, φ_v – фаза.

Объемная плотность выделенной энергии ВЭМП w за время воздействия T в координате $Z=0$ точки источника ВЭМП может быть определена как

$$w_{Z=0} = \int_0^T \frac{u^2(t)}{X(t)} dt ,$$

где $X(t)$ – временная зависимость изменения индуктивного сопротивления обмотки якоря.

Суммарная объемная плотность энергии всех гармоник ВЭМП составляет

$$\sum_{v=1}^{\infty} w_{v,Z=0} = \sum_{v=1}^{\infty} \frac{U_{Mv}^2}{X_v} \int_0^T \sin^2(v\omega t) dt ,$$

где X_v – индуктивное сопротивление v -гармоники.

Объемная плотность энергии гармоник на расстоянии Z от источника

$$w_{v,Z} \equiv 1/Z^{v+2} .$$

Суммарная плотность выделенной энергии всех гармоник ВЭМП в точке Z

$$\sum_{v=1}^{\infty} w_{v,Z} = \sum_{v=1}^{\infty} w_{v,Z=0} / Z^{v+2} .$$

Математическое моделирование ЭМ позволяет анализировать влияние электромагнитных повреждений на ВЭМП, но без детального учета насыщения ферромагнитных материалов, косвенно учитывать зубчатость сердечников ЭМ, дискретность распределения обмоток по пазам, частотное изменение активных и индуктивных сопротивлений обмоток, упрощенно учитывать пространственное затухание высокочастотных составляющих ВЭМП.

В. Численные полевые модели электромагнитных полей электрических машин с электромагнитными повреждениями

Уточненное моделирование распределения ВЭМП ЭМ с электромагнитными повреждениями возможно на численных $2D$ и $3D$ полевых моделях с использованием, например, метода конечных элементов. Эффективно применение распространенных программных комплексов *Elcut* и *Ansoft Maxwell* в $2D/3D$ постановках с решением дифференциальных уравнений Максвелла

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \vec{j}_{\text{ст}} + \vec{j}_{\text{пр}} = \vec{j}_{\text{ст}} + \vartheta \vec{E}; \operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}; \vec{B} = \operatorname{rot} \vec{A};$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0; \vec{j}_{\text{пр}} = -\vartheta \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \operatorname{grad} V \right), \vec{B} = \mu(H) \vec{H};$$

$$\operatorname{rot} \frac{1}{\mu} \operatorname{rot} \vec{A} = \vec{j}_{\text{ст}} - \vartheta \left(\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} + \operatorname{grad} V \right),$$

где B , H , E и J – индукция, напряженности магнитного и электрического полей, плотность тока; μ – магнитная проницаемость среды; A – векторный магнитный потенциал.

При решении уравнения нестационарного электромагнитного поля ЭМ с электромагнитными повреждениями на конечно-элементной модели с корректной дискретизацией по пространственной и временной координатам минимизируется «энергетический» функционал Q

$$Q = \iiint_{xyz} \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu \pm \Delta\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{\mu \pm \Delta\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{\mu \pm \Delta\mu} \left(\frac{\partial A}{\partial z} \right)^2 \right] + (\vartheta \pm \Delta\vartheta) \left(A \frac{\partial A}{\partial x} \right) - (j \pm \Delta j) A \right\} dx dy dz .$$

Алгоритм расчета электромагнитного поля в проводящей среде при гармоническом возбуждении предполагает для каждой гармоники ν минимизацию энергетического функционала с комплексным магнитным потенциалом \dot{A} при усредненных магнитных проницаемостях на периоде

$$Q = \iiint_{xyz} \left\{ \frac{1}{2} \left[\frac{1}{\mu \pm \Delta\mu} \left(\frac{\partial \dot{A}}{\partial x} \right)^2 + \frac{1}{\mu \pm \Delta\mu} \left(\frac{\partial \dot{A}}{\partial y} \right)^2 + \frac{1}{\mu \pm \Delta\mu} \left(\frac{\partial \dot{A}}{\partial z} \right)^2 \right] + \frac{1}{2} i\nu\omega (\vartheta \pm \Delta\vartheta) \dot{A}^2 - (j \pm \Delta j) \dot{A} \right\} dx dy dz .$$

Расчет электромагнитной энергии ВЭМП в точке пространства Z может быть выполнен через объемные плотности энергии каждой ν -той гармоники ВЭМП по магнитной индукции $B\nu, Z(t)$

$$w_{v,z} = \frac{\mu_0}{2} \int_0^T B_{v,z}^2(t) dt .$$

При создании конечно-элементных моделей ВЭМП ЭМ возможно детальное задание конфигурации магнитопроводов с зубцово-пазовыми зонами, обмоточных данных, размеров, расположения лобовых частей обмоток, конструкции корпуса, шихтовки, характеристик намагничивания материалов, электромагнитных повреждений. Двухмерные модели АД и СГ представлены на рисунке 2.

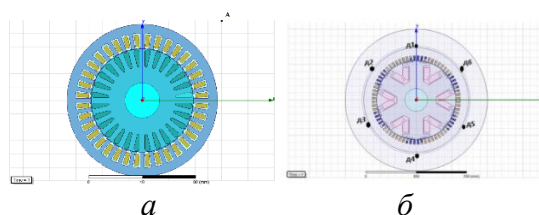


Рис. 2. Двухмерные модели АД (а) и явнополюсной СМ (б)
Д1-Д6 – точки (датчики) контроля ВЭМП на внешней стороне корпуса

В 2D модели возможен учет токов в пазовой части обмоток ЭМ. Однако для полноценного анализа работы ЭМ с несимметричными повреждениями в ОЯ и ОВ в режиме нагрузки использование 2D модели не корректно. В таких условиях ВЭМП, особенно для ЭМ с малым числом полюсов, корректно моделировать в 3D пространстве с учетом лобовых частей. Для неявнополюсного СГ (НЯСГ) с числом полюсов $2p = 2$ лобовые части обмоток имеют значительный вылет и занимают большее пространство, чем, например, для ЭМ с $2p > 4$. При $2p = 2$ токи в лобовых элементах для каждого полюсного деления охватывают половину окружности с углом 180° . Поэтому в НЯСГ при $2p = 2$ нельзя пренебрегать лобовыми частями ОЯ при анализе распределений ВЭМП, целесообразно использование 3D моделей (рис. 3).

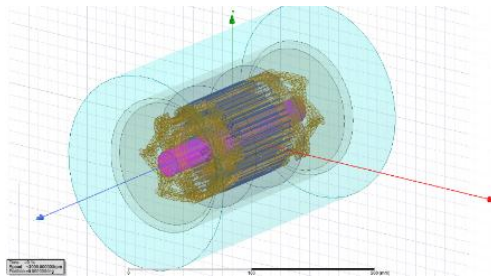


Рис. 3. 3D модель неявнополюсного СГ

Предварительное моделирование работы ЭМ может выполняться в среде *Ansoft Simplorer* или *MATLAB* на основании схем замещения ЭМ для заданной нагрузки в виде внешней цепи, что позволяет определять спектральный состав токов при различных настройках ПЧ. Для корректного анализа ВЭМП ЭМ необходимо использование частотных зависимостей сопротивлений схем замещения ЭМ. Целесообразно предварительное формирование таких зависимостей на основе анализа частных двухмерных полевых моделей ЭМ и обобщение их, например, на основе многомерных сплайнов.

IV. ДИАГНОСТИКА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН НА ОСНОВЕ АНАЛИЗА РАСПРЕДЕЛЕНИЯ ВЭМП

Модельный анализ ВЭМП может выполняться для номинальной нагрузки АД, при работе СГ в режимах холостого хода (ХХ), активной (R), индуктивной (L) и емкостной (C) нагрузок при повреждениях в ОВ и ОЯ, с учетом демпфирующего действия корпуса. На рисунке 4 представлены распределения индукции ВЭМП АД и явнополюсного СГ (ЯСГ) при синусоидальном напряжении.

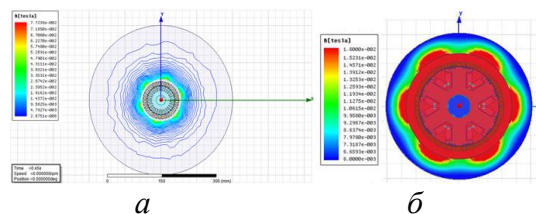


Рис. 4. ВЭМП АД (а) и ЯСГ (б) при синусоидальном напряжении

В исправном ЭМ круговая диаграммы амплитуд напряженности ВЭМП при синусоидальном питающем напряжении однородны и симметричны. Так как ЭМ имеют по шесть полюсов, то эквипотенциали индукции ВЭМП формируют шестиугольники. Конфигурация линий равных напряженностей/индукций ВЭМП и форма их деформации являются индикатором локальных нарушений в структуре ЭМ. Спектральный анализ индукции магнитного поля в точках на поверхности ЭМ выявляет ярко выраженную первую (50 Гц) гармонику. Результаты моделирования ВЭМП в виде распределения объемной плотности энергии представлены на рисунке 5 и демонстрируют достаточный уровень для регистрации датчиками.

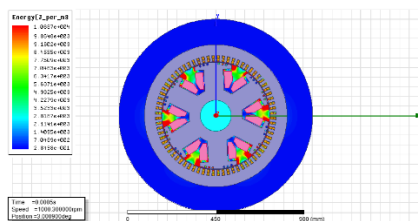


Рис. 5. Распределение объемной плотности энергии ВЭМП СГ

А. Анализ распределений электромагнитных полей явнополюсного синхронного генератора с электромагнитными повреждениями обмоток возбуждения и якоря

При исправных ОВ полюсов СГ в режиме ХХ распределение ВЭМП симметрично относительно оси d (рис. 6). Минимальные значения магнитной индукции ВЭМП отмечаются на осях полюсов, максимальные – между полюсами. При повреждениях в ЭМ симметричность круговой диаграммы индукции ВЭМП нарушается. Повреждение ОВ одного из шести полюсов (несимметричное) искажает симметрию распределения ВЭМП, отличающихся для режимов ХХ и нагрузки. Уменьшение МДС ОВ одного из полюсов нарушает симметрию распределения ВЭМП в целом, но формирует его симметричным относительно диаметральной оси, положение которой определяется положением поврежденного полюса и характером нагрузки. В режиме ХХ распределение ВЭМП симметрично относительно оси

поврежденного полюса. При $R-L$ нагрузке диаметрально ось симметрии ВЭМП смещается с оси поврежденного полюса против направления вращения ротора.

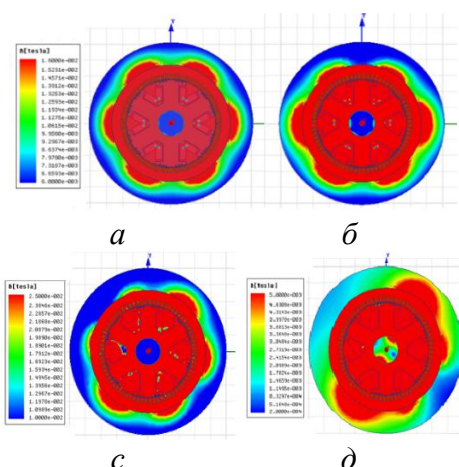


Рис. 6. Распределение индукции ВЭМП СГ:
 а – исправная ОВ при ХХ, б – повреждено 50% витков ОВ одного полюса;
 в – 50 % замыкание витков ОВ одного полюса при R-С номинальной нагрузке,
 д – при R-L нагрузке

Результаты расчетов индукции ВЭМП ЯСГ в режиме ХХ при повреждении ОВ полюса №1 представлены на рисунке 7,а в (мТл) и в (%) от значений индукций при отсутствии повреждений (рис. 7,б). Нумерация кривых соответствует положению датчиков на рисунке 2,б.

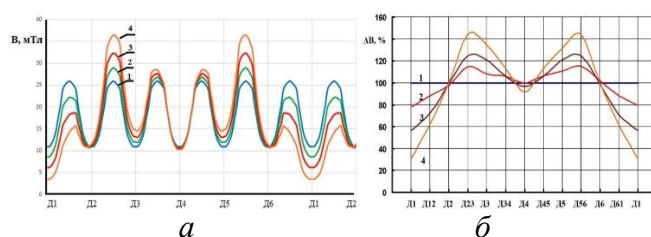


Рис. 7. Изменение индукции ВЭМП в мТл (а) и в % (б) при ХХ для МДС полюса №1:
 1 – 100 %; 2 – 75 %; 3 – 50 %; 4 – 25 %

Повреждение ОВ полюса в режиме ХХ приводит к уменьшению индукции ВЭМП в межполюсном пространстве соседних пар полюсов и на оси поврежденного полюса. При удалении от оси поврежденного полюса индукция ВЭМП между полюсами увеличивается. Индукция ВЭМП изменяется от 1,0 до

33,7 мТл при отсутствии проводящего корпуса СГ и от 0,1 до 1,96 мТл при наличии проводящего корпуса. Из анализа результатов следует, что наибольшие изменения индукции ВЭМП наблюдаются на оси полюса №1 и в межполюсных пространствах №2-3 и №5-6. По мере снижения МДС полюса №1 до 75, 50 и 25 % нормальной величины индукция ВЭМП на оси этого полюса уменьшается, соответственно, на 22, 43 и 68 % от нормального значения. В межполюсных пространствах №2-3 и №5-6 индукция, наоборот, возрастает на 14,5, 24,6 и 44,2 %. По максимальному относительному изменению индукции ВЭМП можно диагностировать поврежденный полюс и степень его повреждения.

В режиме *R* нагрузки (рис. 8) изменение индукции ВЭМП при уменьшении МДС полюса проявляется сильнее, чем в режиме ХХ. Наиболее заметно изменяется индукция ВЭМП между полюсами. По мере снижения МДС полюса №4 до 75, 50 и 25 % нормальной величины индукция ВЭМП в межполюсных пространствах увеличивается, соответственно, на 54,5; 127,5 и 219,8 %.

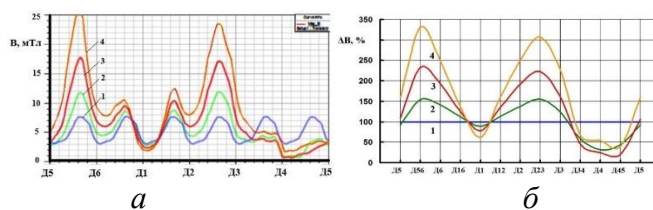


Рис. 8. Изменение индукции ВЭМП в мТл (а) и в % (б) при *R* нагрузке для МДС полюса №4:
1 – 100 %; 2 – 75 %; 3 – 50 %; 4 – 25 %

Относительное изменение индукции ВЭМП между полюсами №2-3 и №5-6 ЯСГ при разной степени повреждения ОВ полюса №1 для разных нагрузок представлено на рисунке 9,а. Повреждение ОВ полюса диагностируются более точно по несимметрии индукции ВЭМП при *R-L* нагрузке, но сами значения индукций меньше. Зависимости позволяют проводить выявление степени повреждения ОВ по несимметрии индукции ВЭМП (рис. 9,б).

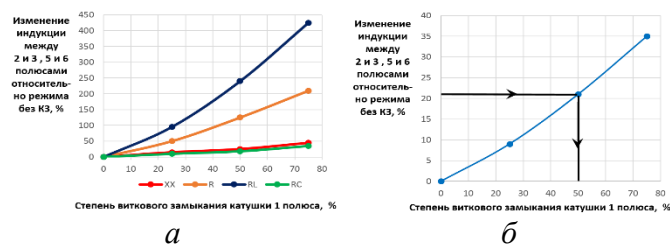


Рис. 9. Изменение индукции ВЭМП между полюсами №2-3 и №5-6 СГ в зависимости от степени повреждения ОВ полюса №1 (а) и определение степени повреждения ОВ полюса по относительной несимметрии индукции ВЭМП (б)

Повреждение ОЯ также вызывает искажение распределения ВЭМП. На рисунке 10 представлено распределение индукции ВЭМП СГ с тремя закороченными витками ОЯ в фазе С на полюсном делении в зоне полюса №1.

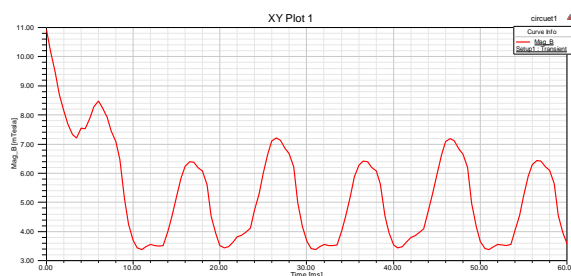


Рис. 10. Изменение индукции ВЭМП СГ при движении ротора с исправной ОВ и замыканием трех витков в одной фазе ОЯ

При исправной ОВ, но при замыкании трех витков в одной из фаз ОЯ, индукция ВЭМП на поверхности статора изменяется во времени волнообразно с разными амплитудами полувольт, т.к. амплитуда МДС фазы с повреждением снижается. Наблюдаются три малых и три больших волны, что соответствует шести полюсам. Амплитуды волн индукции ВЭМП отличаются 12 %. Цикличность изменений свидетельствует о неподвижности электромагнитного повреждения. Сдвиг вершин волн от осей полюсов определяется местом повреждения ОЯ и видом нагрузки.

На рисунке 11,а представлено распределение ВЭМП ЯСГ при существенном повреждении ОЯ - обрыве одной из трех параллельных ветвей фазы С в зоне полюса №1. Распределение ВЭМП симметрично относительно

места повреждения ОЯ. Индукции ВЭМП существенно увеличивается над датчиками №6 и №3, в меньшей степени над датчиками №5 и №4, малые значения индукции фиксируются датчиками №1 и №2. Индукция ВЭМП по окружности сердечника изменяется несимметрично с двумя наиболее выраженными волнами с максимумами до 0,49 мТл с амплитудами отличающимися в 4 раза (рис. 11,б). Так как ОЯ неподвижна, то по сигналу с одного стационарного датчика невозможно определить место неисправности. Необходимо использование нескольких распределенных вокруг ЭМ датчиков.

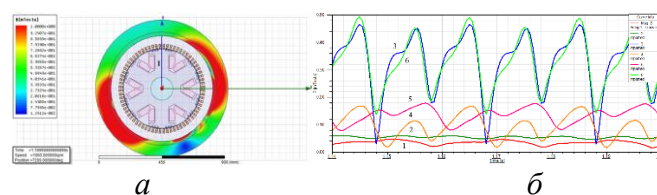


Рис. 11. Изменение индукции ВЭМП СГ при обрыве одной из трех параллельных ветвей ОЯ

Режим совместных повреждений - обрыв параллельной ветви ОЯ и частичное витковое замыкание В одного полюса реализовывался путем сочетания повреждений в модели. Учтено влияние демпфирования металлического немагнитного корпуса машины с электропроводностью $10 \cdot 10^6$ См/м, проявляющееся в снижении амплитуд индукций в несколько раз, но значений индукций ВЭМП остаются достаточными для фиксации повреждений.

В. Анализ распределения электромагнитных полей неявнополюсного синхронного генератора с электромагнитными повреждениями ОВ

На рисунке 12 представлены результаты 3D моделирования ВЭМП НЯСГ.

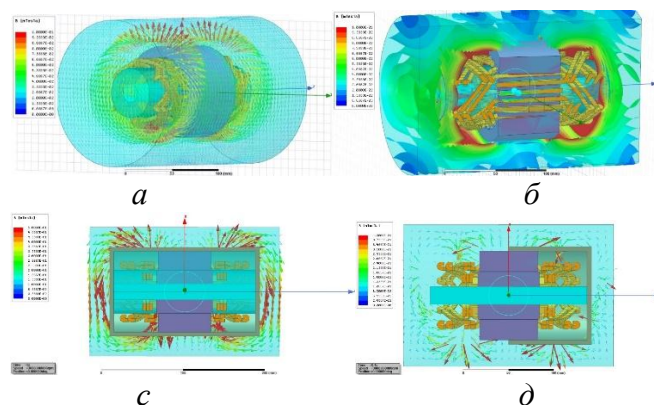


Рис. 12. Результаты 3D моделирования ВЭМП НЯСГ:
а – векторное поле индукции; *б* – цветовая гамма индукции, режим ХХ;
с – продольное сечение, режим ХХ; *д* – режим нагрузки

В режиме ХХ НЯСГ без электромагнитных повреждений распределение ВЭМП имеет ярко выраженное объемное характер и симметрично относительно магнитной оси машины. При нагрузке распределение ВЭМП становится асимметричным относительно осей машины. Выявлено, что анализ распределений ВЭМП следует проводить не только по модулям векторов магнитной индукции, но и по ее составляющим: радиальной, осевой и тангенциальной. Так как повреждения ОВ в ВЭМП проявляются циклично с периодом, определяемым частотой вращения, то для диагностики повреждения ОВ достаточно одного датчика ВЭМП. Более информативно устанавливать трехкоординатный датчик магнитного поля для регистрации составляющих индукции в разных плоскостях.

Определено, что при ХХ наиболее информативна тангенциальная составляющая вектора магнитной индукции. В режиме номинальной R нагрузки достаточно сильно выражены осевые составляющие индукции, в режиме ХХ они выражены слабее. Выявлено, что при нагрузке наиболее рационально контролировать индукцию ВЭМП в точках: 3, 13 - около торцов сердечника статора СГ; 5, 15 - над осью кольцевой части корзины лобовых частей ОЯ; 11, 21 – на поверхности щита СГ ближе к валу машины. Точки внутри корпуса служат для контроля правильности распределения ВЭМП (рис. 13).

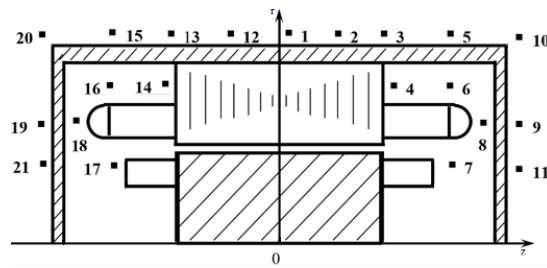


Рис. 13. Точки контроля ВЭМП на продольной модели НЯСГ

Для НЯСГ с $2p=2$ при шести пазах ротора (трех катушках ОВ) на полюс обозначим: $1pN$ - первая катушка, охватывающая большой зуб полюса N ; $2pN$ - следующая катушка; $3pN$ - экваториальная катушка полюса N . Для полюса S аналогично: $1pS$, $3pS$, $2pS$. При изменении индукции ВЭМП в функции угла за нулевое значение принято положение датчика индукции над вершиной большого зуба полюса N . На рисунках 14 представлены графики изменения осевой и тангенциальной составляющих индукций ВЭМП в сечении 3 при ХХ и повреждении одной из катушек ОВ. Аббревиатурой БП обозначены графики изменения индукции без повреждения катушек ОВ.

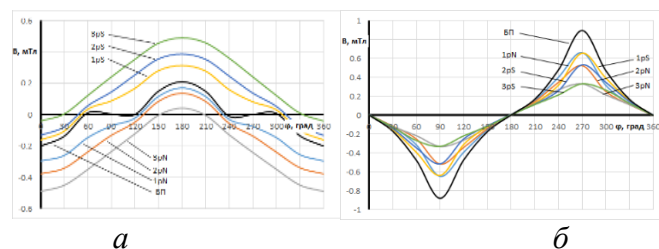


Рис. 14. При повреждениях катушек ОВ в режиме ХХ в сечении 3:
а – осевые составляющие индукции ВЭМП; *б* – тангенциальные

Из анализа графиков следует, что повреждение одной из катушек ОВ при ХХ ведет к системному отклонению индукции ВЭМП от индукции БП. Повреждение катушек N ведет к снижению положения графиков, повреждение катушек S – к повышению их относительно графиков БП. При изменении положения поврежденной катушки ОВ от большого зуба к диаметру смещение графика индукции сильнее. Для тангенциальных составляющих действие N и S катушек одинаково. Наиболее заметно изменяются радиальная индукция в сечении 3 и осевые индукции в сечениях 3 и 5. Тангенциальные индукции дают

меньшие относительные изменения - от 26 до 63 %. При нагрузке R ярко выражены осевые составляющие индукции для точек 11 и 21 (рис. 15). Зависимости находятся в противофазе, так как точки расположены с противоположных торцов.

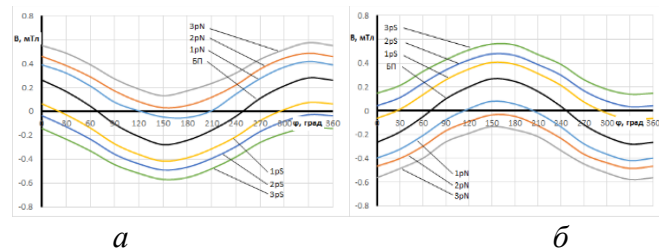


Рис. 15. Осевые составляющие индукции ВЭМП в точках 11 (а) и 21 (б) при повреждениях катушек ОВ

При $R-L$ нагрузке с $\cos \varphi = 0,8$ размагничивающее действие реактивной составляющей реакции якоря незначительно влияет на индукцию ВЭМП, несколько уменьшая ее и изменяя фазу. Радиальная составляющая, которую обычно и измеряют при исследовании ВЭМП ЭМ, проявляется слабо, но в сечениях 3 и 5 становится хорошо фиксируемой. При нагрузке тангенциальную составляющую индукции контролировать в целях диагностики повреждений ОВ нецелесообразно, в виду ее малого значения. В режиме ХХ целесообразен контроль всех составляющих индукции в сечениях, соответствующих торцам сердечника и на подшипниковых щитах НЯСГ ближе к валу. При ХХ тангенциальная составляющая индукции ВЭМП на поверхности сердечника в 2-4 раза больше радиальной и осевой составляющих, что целесообразно для определения повреждений ОВ. При R и $R-L$ нагрузке НЯСГ целесообразен контроль индукции в сечениях торцов сердечника статора и на поверхности щита ближе к валу, радиальной составляющей индукции в сечении над лобовыми частями ОЯ. Высшие пространственные гармоники МДС ОВ выражены относительно амплитуды первой гармоники незначительно: третья гармоника v_3 не превышает 3,5 %, пятая гармоника v_5 – 2,0 %, седьмая гармоника v_7 – 2,5 %.

Для определения места повреждения ОВ НЯСГ может быть использован числовой критерий несимметричности распределения индукции ВЭМП – коэффициент несимметрии поля (КНП), определяемый как отношение средней индукции к амплитуде пульсации индукции. Без повреждений (БП) ОВ график индукции симметричен относительно оси абсцисс и КНП=0. При повреждениях катушек ОВ КНП отличен от нуля. КНП информативен именно для НЯСГ с $2p=2$, у которых повреждение одной катушки ОВ вызывают не локальную несимметрию индукции, как у многополюсных ЯСГ, а несимметрию распределения ВЭМП всего НЯСГ. Знак КНП указывает полюс, в котором повреждена катушка ОВ, значение КНП указывает степень повреждения катушек ОВ. Анализ КНП позволяет диагностировать и локализовать поврежденную катушку ОВ на роторе.

Для автоматизации диагностики повреждения катушек ОВ разработаны алгоритм и программа гармонического анализа изменения индукций ВЭМП НЯСГ. Программа объединяет способы выявления повреждений катушек ОВ по КНП и гармоническому анализу.

Максимальные индукции ВЭМП при повреждениях ОВ достигают 0,59 мТл, что позволяет их уверенно фиксировать. Проведены экспериментальные исследования ВЭМП модели НЯСГ. Сигналы датчика по радиальной, осевой и тангенциальной составляющих индукции ВЭМП обрабатывались ПК. На рисунке 16 представлены изменения КНП при повреждениях катушек ОВ при ХХ.

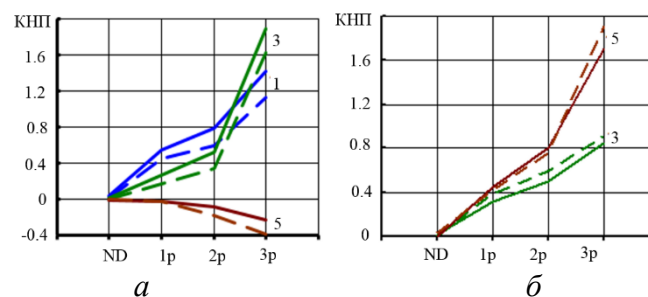


Рис. 16. КНП при повреждениях катушек ОВ, режим ХХ: сплошные линии – расчет; штриховые – эксперимент: *а* – радиальные составляющие индукции ВЭМП в т.1, 3 и 5; *б* – осевых составляющие в т.3 и 5

Сравнение результатов расчета и эксперимента показывают их достаточно хорошую сходимость, что обосновывает целесообразность использования КНП для выявления повреждений катушек ОВ НЯСГ.

На Ивановской ТЭЦ-2 филиала «Владимирский» ПАО «Т Плюс» проведены измерения датчиками Холла радиальной, осевой и тангенциальной индукций ВЭМП на корпусах работающих ТГ-2 тип ТВС-32У3 и ТГ-3 тип ТВФ-63-2У3 ТГ с компьютерной обработкой и спектральным анализом результатов (рис. 17). Выявлено, что индукции ВЭМП на корпусе ТГ достигают 200 мкТл и уверенно фиксируются датчиками Холла.

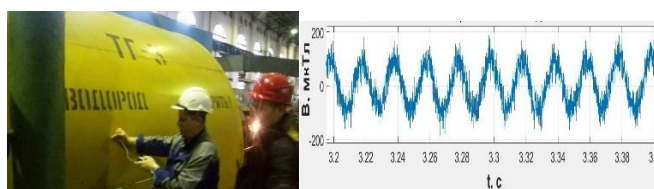


Рис. 17. Измерения индукции ВЭМП на корпусе ТГ

С. Анализ распределений электромагнитных полей частотно-регулируемого асинхронного двигателя

Выполнено моделирование и анализ ВЭМП частотно-регулируемым АД небольшой мощности при питании от ПЧ с синусоидальной ШИМ при несущих частотах $f_H=600$ Гц и 1200 Гц. Напряжение отдельных гармоник, например 22, достигало 27,2 % от напряжения 1 гармоники для $f_H=600$ Гц и 23,5 % для $f_H=1200$ Гц. Влияние высокочастотных составляющих ВЭМП проявляется в большей изломанности линий эквипотенциалей индукции ВЭМП АД при питании от ПЧ с синусоидальной ШИМ напряжения с $f_H=600$ Гц, по сравнению с питанием синусоидальным напряжением. Изменение f_H ШИМ меняет частотный спектр питающего напряжения (рис. 18). В распределении индукции ВЭМП проявляются высокочастотные составляющие гармоник (рис. 19).

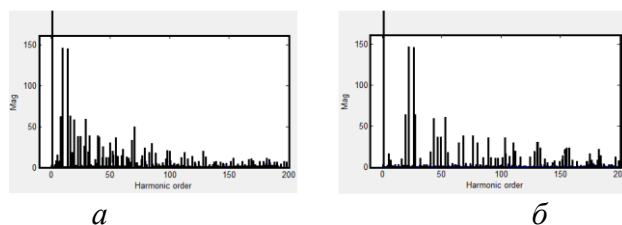


Рис. 18. Диаграммы амплитуд гармоник напряжения при несущей частоте инвертора 600 Гц (а), при несущей частоте 1200 Гц (б)

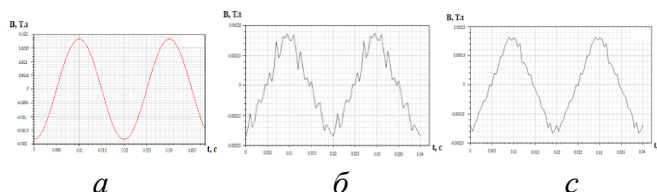


Рис. 19. Изменение индукции ВЭМП АД при работе с синусоидальным напряжением (а), от ПЧ с ШИМ для $f_H=600$ Гц (б), для $f_H=1200$ Гц (с)

Высокочастотные составляющие увеличивают амплитуду индукции ВЭМП АД с 185 мкТл для синусоидального напряжения до 210 мкТл и 200 мкТл для $f_H = 600$ Гц и $f_H = 1200$ Гц, соответственно, т.е. на 13,5 % и 8 %. С уменьшением f_H амплитуда индукции ВЭМП растет, форма индукции искажается сильнее. Экспериментальное определение амплитуд индукций ВЭМП показало, что погрешность их определения не превысила 5,54 %.

Для АД ТАДВМ280-4У2 мощностью 170 кВт аналогичное моделирование в точке на расстоянии 0,9 м от оси АД, показало, что амплитудное значение индукции ВЭМП АД повышается с 116 мкТл для синусоидального питающего напряжения до 205 мкТл и 170 мкТл для при питании от ПЧ с $f_H = 600$ Гц и $f_H=1200$ Гц, соответственно, т.е. на 76,7 % и 46,6 %. В эксперименте, выполненным ПАО «НИПТИЭМ» индукция ВЭМП при синусоидальном питающем напряжении составила 105 мкТл. Погрешность предлагаемого расчета по сравнению с экспериментальными данными не превысила 10,5 %, что свидетельствует о достаточной точности расчетов.

На временном отрезке $T = 1/200$ с объемные плотности энергии ВЭМП для 1 и 22 гармоник напряжения составили $w_{1,Z=0} = 0,052$ и $w_{22, Z=0} = 0,003$ Дж/м³, соответственно, т.е. добавка только от 22 гармоники составляет около

6 %. С увеличением порядка гармоники пространственное затухание ВЭМП усиливается. Суммарная объемная плотность энергии ВЭМП на расстоянии 1,5 и 2 метра от АД составили 0,046227 Дж/м³ и 0,0195003 Дж/м³, соответственно. Полученные значения энергии ВЭМП АД уже сопоставимы с критически допустимыми уровнями воздействия на средства микропроцессорной техники.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Аварии мощных ЭМ, вследствие электромагнитных повреждений, могут приводить к отказам с тяжелыми последствиями и существенным экономическим ущербом. Целесообразно применение усовершенствованных методов диагностики ЭМ, развитие бесконтактных методов выявления внутренних электромагнитных повреждений.

Внешнее электромагнитное поле (ВЭМП) работающих ЭМ содержит информацию о повреждениях ЭМ. Внутренние электромагнитные повреждения обмоток и магнитной системы вызывают изменения ВЭМП.

Бесконтактные системы диагностики электромагнитных повреждений на основе анализа распределений ВЭМП интенсивно развиваются для разных типов ЭМ.

Представлены уточненные математические аналитические и численные 2D/3D полевые модели ВЭМП ЭМ с электромагнитными повреждениями.

Определены несимметрии распределения ВЭМП ЭМ, их пространственные и временные изменения в режимах ХХ и нагрузки при электромагнитных повреждениях ОВ и ОЯ, совместные проявления повреждений с учетом экранирования корпуса. Установлены взаимосвязи между степенью электромагнитных повреждений элементов ЭМ и искажениями распределения ВЭМП, выявлены диагностические признаки электромагнитных повреждений. Разработаны методика бесконтактного выявления электромагнитных повреждений и алгоритмы диагностики ЭМ на основе анализа возникающих изменений ВЭМП.

Обоснована система точек анализа индукции ВЭМП на корпусе ЭМ при ХХ и нагрузках с использованием одного или нескольких датчиков, ориентированных по разным осям, определены составляющие индукции ВЭМП для уверенной диагностики повреждений.

Экспериментально и вычислительно установлено, что индукции ВЭМП на корпусе работающих ЭМ достаточны для уверенной регистрации датчиками Холла.

Высокочастотные составляющие тока частотно-регулируемых ЭМ при работе от ПЧ с ШИМ напряжения расширяют частотный диапазон гармоник ВЭМП, повышают индукцию ВЭМП до 13,5 % и электромагнитную энергию до 10 %, по сравнению с синусоидальным напряжением. Спектральный анализ изменений гармоник ВЭМП частотно-регулируемых ЭМ расширяет возможности диагностики электромагнитных повреждений ЭМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Capolino G., Romary R., Henaou, Pusca R. State of the Art on Stray Flux Analysis in Faulted Electrical Machines // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2019. – VOL. 65. – No 3. – pp. 181–187.
2. Аполлонский С.М., Горский А.Н. Диагностика работы технических средств по структуре их внешних электромагнитных полей // Электротехника. - 2021, №11. - С. 44-52.
3. Ройтгарц, М.Б. Внешние магнитные поля электрических машин с экранами сложной формы: автореф. диссер. ... канд. техн. наук: 05.09.01. – Ленинград, 1982.
4. Сотников, В.В. Развитие теории внешнего магнитного поля асинхронных двигателей, способов его снижения и измерения: автореф. дис. д-ра техн. наук: спец. 05.09.01. – Казань, 2002. – 38 с.
5. Voitto Kokko. Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements: academic Dissertation / University of Oulu. – Oulu, Finland, 2003. – 102 p.
6. Пашали, Д.Ю. Диагностика электромеханических преобразователей по внешнему магнитному полю: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.09.01. – Уфа, 2004. – 16 с.
7. Бойкова, О.А. Функциональная диагностика неисправностей электромеханических элементов электротехнических комплексов по внешнему электромагнитному полю: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.09.03. – Уфа, 2011. – 19 с.
8. Negrea M.D. Electromagnetic flux monitoring for detecting faults in electrical machines: Doctoral Dissertation. – Helsinki University of Technology, 2006. – 137 p.
9. Жумангулов, К.К. Внешние магнитные поля электромеханических преобразователей электротехнических комплексов: автореф. дис. д-ра техн. наук: спец. 05.09.03 – Алматы, 2006. – 41с.
10. Тонких, В.Г. Метод диагностики асинхронных электродвигателей в сельском хозяйстве на основе анализа параметров их внешнего магнитного поля: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.20.02. – Барнаул, 2009. – 20 с.

11. Сидельников Л.Г., Афанасьев Д.О. Обзор методов контроля технического состояния асинхронных двигателей в процессе эксплуатации// Вестник ПНИПУ. Геология. Нефтегазовое и горное дело. - 2013. - № 7. – С. 127-137.
12. Вавилов В.Е., Пашали Д.Ю., Саяхов И.Ф., Айгузина В.В. Исследование внешнего магнитного поля асинхронного электродвигателя// Вестник УГАТУ - 2016, Т.20, №1(71) - С.122–127.
13. Новоселов, Е.М. Разработка метода функциональной диагностики обмотки ротора асинхронных электродвигателей собственных нужд электростанций по внешнему магнитному полю: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.14.02. – Иваново, 2018. – 20 с.
14. Бельский, И.О. Разработка методов и средств диагностики асинхронных электродвигателей по параметрам внешнего магнитного поля: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.13.01. –Иркутск, 2020. – 18 с.
15. Епремян, А.В. К вопросу диагностирования синхронных машин по их внешнему магнитному полю // Изв. вузов. Электромеханика. - 1999. № 4. С. 7–9.
16. Roytgarts M. Method of Shorted Turn Monitoring in the Turbogenerator Rotor Winding // Int. Conf. on Electric Power Systems. – Tenerife, Spain, 2005. – P. 468–473.
17. Yaghobi H., Ansari K., Rajabi Mashhadi H. Analysis of Magnetic Flux Linkage Distribution in Salient-Pole Synchronous Generator with Different Kinds of Inter-Turn Winding Faults // Iranian Journal of Electrical & Electronic Engineering. – 2011. – Vol. 7. – № 4. – P. 260–272.
18. Полищук, В.И. Развитие теории построения систем диагностики синхронных машин: автореф. дис. д-ра. техн. наук: спец. 05.09.01. – Самара, 2016. – 36 с.
19. Dos Santos H.F., Rigoni M., R.deA. Elias, Feler L.A., Wengerkievicz C.A.C., Batistela N.J., Sadowski N., Kuo-Peng P., Bastos J.P.A. Non-invasive monitoring system of synchronous generator using external field // Journal of Microwaves, Optoelectronics and Electromagnetic Applications, Vol. 16. – March 2017. – № 1. – pp. 70–89.
20. Irhoumah M., Pusca, Lefevre E., Mercier D., Romary R., Demian C. Information fusion R. with belief functions for detection of interturn short-circuit faults in electrical machines using external flux sensors // IEEE Trans. Ind. Appl. – 2018. – VOL. 65. – No 3. – pp. 2642–2652.
21. Yu.B. Kazakov, A.N. Morozov, I.V. Gulyaev. Simulative Asymmetry of the External Electromagnetic Field in the Case of Damage to Synchronous Generators// Russian Electrical Engineering - 2019, Vol.90, №1. P.11-16.
22. Морозов, А.Н. Выявление электромагнитных повреждений синхронных генераторов на основе анализа несимметрий внешнего магнитного поля: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 2.4.2. – Иваново, 2022. – 20 с.
23. Morozov A.N., Kazakov Ju.B., Morozov N.A., Nesterov S.A. Identification of Internal Electromagnetic Defects of Implicit-Pole Synchronous Generators Based on the Information of its External Magnetic Field // Problemele energeticii regionale - №3(55), 2022, pp. 27-37.
24. Ehya H., Nysveen A. Pattern Recognition of Interturn Short Circuit Fault in a Synchronous Generator Using Magnetic Flux // IEEE Transactions On Industry Applications. - 2021, Vol. 57, N. 4. - P. 3573–3581.
25. Шумилов, Е.А. Анализ способов и методов снижения внешних электромагнитных полей асинхронных двигателей при питании широтно-импульсно модулированным напряжением: автореф. дис. канд. тех. наук: спец. 05.09.01. – Самара, 2013. – 20 с.
26. Казаков Ю.Б., Шумилов Е.А., Тамъяров А.В., Морозов А.Н. Внешние электромагнитные поля электродвигателей и способы их снижения. – Иваново: ИГЭУ, 2017. – 116 с.
27. Y. Kazakov, N. Morozov, E. Shumilov. Analysis of the electromagnetic radiation distribution of frequency-controlled electric machines in order to diagnose their performance // 2020 Int. Conf. on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa - Publisher: IEEE Xplore: 09 December 2020, pp. 1-4. doi:10.1109/ICOECS50468.2020.9278477
28. Добродеев, П.Н. Повышение эффективности методов снижения внешнего магнитного поля электрических машин постоянного тока: автореф. дис. канд. техн. наук: спец. 05.09.01 – Харьков, 2005 – 20с.

ОПЫТ АО «КОРПОРАЦИЯ «ВНИИЭМ» И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ АКТИВНЫХ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Аннотация: Рассмотрены основные этапы развития электромагнитных подшипников, которые применяются в различных разработках АО «Корпорация «ВНИИЭМ» в области космической техники и для газовой промышленности.

Ключевые слова: электромагнитные подшипники, активный магнитный подвес, система управления магнитным подвесом, импортозамещение.

I. ВВЕДЕНИЕ

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» является одним из пионеров создания активных магнитных подшипников (АМП) в мировой практике. В 60-х годах прошлого века в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» начало формироваться отдельное научно-техническое направление по проектированию и изготовлению роторных машин различного назначения с АМП. Особенно следует отметить применение систем АМП производства АО «Корпорация «ВНИИЭМ» в газовой промышленности. За последние 25 лет АО «Корпорация «ВНИИЭМ» поставило более 300 комплектов АМП для газоперекачивающих агрегатов ПАО «Газпром».

II. ОПЫТ АО «КОРПОРАЦИЯ «ВНИИЭМ» ПО СОЗДАНИЮ АМП

История развития АМП в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» началась с поиска технического решения и создания шарового электродвигателя-маховика с магнитным подвесом ротора для систем ориентации космических аппаратов [1]. Впервые было осуществлено промышленное изготовление этого типа бесконтактных опор и, несмотря на их относительную техническую сложность, доказана возможность перехода от теоретических и лабораторных исследований к промышленной реализации.

Дальнейшим развитием АМП стало их применение в высокоскоростных двухступенных силовых гироскопах-гиродинах системы ориентации космической станции «Мир». Модель гиродина в разрезе показана на рис. 1

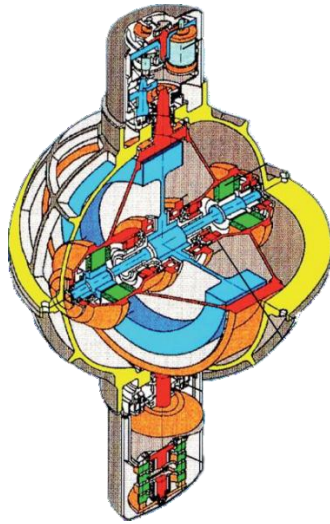


Рис. 1. Двухступенной гироскоп-гиродин с АМП

В результате создания гиродинов с АМП во ВНИИЭМ была создана теоретическая и практическая база, открывающая возможность для широкого внедрения АМП в различные отрасли техники.

В конце 80-х годов XX в. Начинается разработка АМП для электрических машин и механизмов с массой ротора до 1000 кг. В связи с переходом в новую область применения АМП потребовалось уточнить некоторые технические решения, вытекающие из условий работы машин, и характера действующих нагрузок. Выросли нагрузочная способность и габариты электромагнитов, в связи с чем потребовалось более чем в десять раз увеличить мощность аппаратуры управления. Это привело к созданию нового образца системы управления магнитным подвесом (СУМП), работающая от промышленной трехфазной сети и от резервного источника (аккумуляторной батареи) напряжением 110 В.

В начале 90-х годов XX в. Впервые в России на компрессорных станциях г. Сызрани и г. Тольятти были введены в эксплуатацию три газоперекачивающих агрегата (ГПА) мощностью 16 МВт с АМП, изготовленными во ВНИИЭМ. Некоторые особенности применения систем магнитного подвеса в этих агрегатах и результаты их опытной эксплуатации, достаточно подробно рассмотренные в [2], в значительной степени определили дальнейшее развитие АМП для этой отрасли техники.

Общий вид компрессора с АМП, показанный на рис. 2, позволяет оценить соотношение габаритных размеров АМП, которые видны со свободной стороны ротора в центральной части с торца корпуса, и компрессора в целом. Габаритные размеры у АМП несколько больше, чем у традиционных масляных опор, но несмотря на это их применение в ГПА оказывается предпочтительным.



Рис. 2. Центробежный компрессор с АМП

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» долгое время являлось основным разработчиком и изготовителем АМП для ПАО «Газпром». Был разработан ряд АМП и введено в эксплуатацию более 300 комплектов АМП различных модификаций. СУМП была переведена с аналогового на цифровое регулирование, амплитуда широтно-импульсной модуляции (ШИМ) на электромагнитах значительно увеличена.

Одновременно с разработками АМП для ГПА в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» велись работы по созданию систем магнитного подвеса для турбодетандерных агрегатов, высокооборотных электрических машин различного назначения и газовых турбин.

Применяемые в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» методики проектирования АМП [3, 4] прошли апробацию и позволяют разрабатывать системы магнитного подвеса, не уступающие по своим характеристикам мировым аналогам.

Оборудование АО «Корпорация «ВНИИЭМ» и отработанные технологии производства позволяют выполнять полный производственный цикл изготовления и испытаний АМП. Для нужд газовой промышленности

разработан ряд серийных систем магнитного подвеса для газоперекачивающих агрегатов мощностью от 6 до 25 МВт.

В марте 2022 года в АО «Корпорация «ВНИИЭМ» поступило большое количество запросов на поставку АМП с характеристиками и габаритно-присоединительными размерами, соответствующими АМП производства концерна SKF. В течение нескольких месяцев было разработано несколько типоразмеров АМП для ГПА и турбодетандеров, формируется новый оптимизированный ряд систем магнитного подвеса, который позволит провести импортозамещение продукции SKF без существенных изменений конструкции агрегатов, эксплуатирующихся в ТЭК Российской Федерации.

Следует отметить, что европейские производители АМП применяют электротехнические стали с индукциями насыщения порядка 2 Тл, что позволяет получить удельную грузоподъемность электромагнитов на 15-20% выше в сравнении с распространенными в Российской Федерации электротехническими сталями 2412 и 2421.

В сложившихся внешнеполитических условиях остро стоит проблема создания СУМП на отечественной элементной базе без скрытого импорта. Однако доступная номенклатура и сроки поставки микропроцессоров отечественного производства вызывает известные сложности. В АО «Корпорация «ВНИИЭМ» ведутся работы по созданию модернизированной СУМП без использования импортной электроники.

Важным элементом систем магнитного подвеса ротора является страховочный подшипник, обеспечивающий аварийный выбег ротора агрегата в случае аварийных ситуаций. Требования к страховочным подшипникам имеют следующие отличительные особенности:

- не требуется длительный ресурс работы;
- высокие динамические нагрузки при падении ротора;
- минимальный люфт для обеспечения требуемых зазоров;
- обеспечение не менее 10 аварийных выбегов ротора.

Обычно внешняя обойма страховочного подшипника запрессовывается в корпус агрегата. При штатной работе системы магнитного подвеса ротор не касается внутренней обоймы и страховочный подшипник не вращается. Во время аварийной ситуации отказа АМП страховочный подшипник воспринимает ударные нагрузки как на обойму, так и на тела вращения.

До введения санкций против Российской Федерации концерн SKF фактически являлся монопольным поставщиком страховочных подшипников. В настоящее время отечественные заводы не выпускают подшипники, удовлетворяющие техническим требованиям к страховочным подшипникам. Импортозамещение ряда страховочных подшипников SKF видится перспективным направлением как для применения во вновь создаваемых агрегатах, так и для обеспечения эксплуатации уже существующего оборудования.

АО «Корпорация «ВНИИЭМ» в кооперации с профильными предприятиями промышленности отрабатывает технологию изготовления страховочных подшипников скольжения на основе композитных материалов.

III. ВЫВОДЫ

В АО «Корпорация «ВНИИЭМ» накоплен большой опыт по проектированию, изготовлению, испытаниями и внедрению АМП в различных областях техники. Развитие систем магнитного подвеса и их внедрение в новые типы машин является перспективным. Актуальной является задача по замещению импортных АМП на рынках Российской Федерации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Состояние и перспективы развития электромагнитных подшипников в ФГУП "НПП ВНИИЭМ" / Л. А. Макриденко, А. П. Сарычев, В. П. Верещагин, А. В. Рогоза // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2011. – Т. 120. – № 1. – С. 3-12.
2. Сарычев, А. П. Особенности и опыт создания электромагнитных подшипников для серии компрессоров газоперекачивающих агрегатов / А. П. Сарычев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2009. – Т. 112. – № 5. – С. 3-10.
3. Рогоза, А. В. Разработка методик проектирования и расчета электромагнитных подшипников крупных машин: специальность 05.09.03 "Электротехнические комплексы и

системы": диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Рогоза Александр Валерьевич. – Москва, 2012. – 139 с.

4. Методы проектирования систем электромагнитных подшипников в АО "Корпорация "ВНИИЭМ" / Л. А. Макриденко, А. П. Сарычев, А. С. Абдурагимов [и др.] // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. – 2016. – Т. 152. – № 3. – С. 3-14.

Климов А. В.

ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖИМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ В ТЯГОВОМ ЭЛЕКТРОПРИВОДЕ ЭЛЕКТРОБУСА В УСЛОВИЯХ ЭКСПЛУАТАЦИИ

Аннотация: При контактном взаимодействии шин с дорогой возникают автоколебания. Возбуждение автоколебательных отрицательным образом сказываются на работе механических частей индивидуального электрического привода приводя к их поломкам из-за увеличения динамических составляющих нагрузок в следствии колебаний значений частот вращения и крутящих моментов, в том числе с изменением знака момента. В данной работе приводятся результаты экспериментального исследования возникновения автоколебаний в зоне взаимодействия шины с опорным основанием в условиях эксплуатации. Проанализированы режимы возникновения автоколебаний при частичном и полном скольжении в случае срабатывания антиблокировочной и противобуксовочной систем. Автоколебания крутящего момента и частоты вращения колеса вызывают схожие процессы на валу электродвигателя, что сопровождается колебаниями тока статора.

Ключевые слова: автоколебания, колесо, скольжение, электродвигатель, индивидуальный привод, экспериментальные исследования, ток статора, эксплуатация.

I. ВВЕДЕНИЕ

При контактном взаимодействии колеса с твердым недеформируемым опорным основанием сопровождаемым трением могут возникать автоколебательные процессы [1-6]. Возникновение данных явлений отрицательно сказывается на характеристиках устойчивости, управляемости движения, а также снижает энергоэффективность из-за неоптимального использования тягово-сцепных свойств. Выявление зарождения данного процесса также может быть диагностическим признаком для построения систем активной безопасности и повышения эффективности [7–13]. Математическая модель взаимодействия шины с дорогой описаны в [15-19].

Особенно важно диагностировать и избегать появления автоколебаний в индивидуальных тяговых электрических приводах, особенно с синхронными

электродвигателями, так как эти электрические машины являются системами с низким демпфированием [20, 21], которые по ряду причин находят все большее распространение в приводе. Колебательность процессу вращения ротора тягового электродвигателя дополнительно придают вертикальные колебания колеса ввиду упругого характера его взаимодействия с неровностями дороги, при которых также происходят колебания вертикальных и продольных реакций и, как следствие, крутящего момента.

Появление данного явления связано с особенностями взаимодействия и режима качений колеса (тяговый, ведомый, тормозной). Особый практический интерес представляют тяговые электрические приводы электробусов, которые эксплуатируются на дорогах страны (рис. 1) [22].



Рис. 1. Электробус большого класса КАМАЗ 6282 с индивидуальным приводом ведущих колес

II. ИССЛЕДОВАНИЕ ОСОБЕННОСТЕЙ ПРОТЕКАНИЯ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЗОНЕ ВЗАИМОДЕЙСТВИЯ КОЛЕСА С ДОРОГОЙ

Проанализировать условия зарождения автоколебаний можно на основе дифференциальных уравнений (1, 2), получаемых на основе теоремы о сохранении количества движения и сохранения момента количества движения для системы с тремя степенями свободы (рис. 2, а) для электропривода (рис. 2, б) с помощью критерия Бендиксона Q [14].

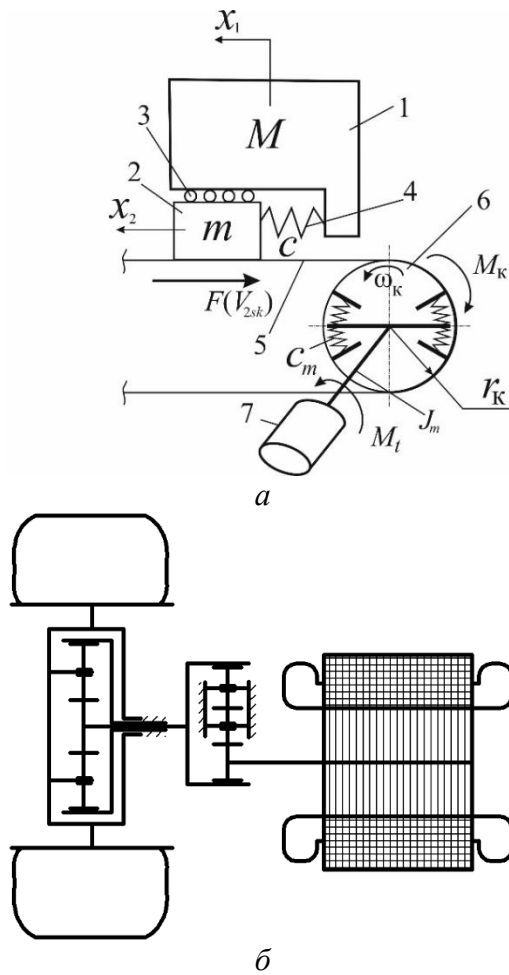


Рис. 2. Схемы взаимодействия эластичного колеса с твердым опорным основанием (а) и схема привода (б):
 1 – масса М подрессоренных частей, приходящаяся на колесо; 2 – масса m колеса;
 3 – ролики, позволяющие перемещаться колесо без трения в продольном направлении; 4 – упругий элемент (податливость шины в продольном направлении);
 5 – опорное основание; 6 – вращающееся колесо; 7 – тяговый электродвигатель

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = V_1 \\ \dot{V}_1 = \frac{c}{M}(x_1 - x_2) \\ \dot{x}_2 = V_2 \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{m}(F - cx_1 + cx_2) \\ \dot{\varphi}_k = \omega_k \\ \dot{\omega}_k = \frac{1}{J_k}[c_m(\varphi_m - \varphi_k) - Fr_k] \\ \dot{\varphi}_m = \omega_m \\ \dot{\omega}_m = \frac{1}{J_m}[-c_m(\varphi_m - \varphi_k) + M_t] \end{array} \right. \quad (1)$$

где J_k, J_m – моменты инерции колеса и приведенный к ротору тягового электродвигателя момент инерции колесного редуктора соответственно относительно оси их вращения; M_t – тяговый крутящий момент, подводимый к колесу.

В случае полного скольжения колеса уравнения, описывающие вращательное движение колеса и вала ротора вырождаются в 0. Так для тягового и ведомого режима в случае полного скольжения возникают «мягкие» автоколебания, возникающие при любых сочетаниях начальных условий, в случае, когда сила трения снижается при росте скорости.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{x}_1 = V_1 \\ \dot{V}_1 = \frac{c}{M}(-x_1 + x_2) \\ \dot{x}_2 = V_2 \\ \dot{V}_2 = \frac{1}{m}(-F + cx_1 - cx_2) \\ \dot{\varphi}_k = \omega_k \\ \dot{\omega}_k = \frac{1}{J_k}[-c_m(\varphi_m - \varphi_k) + Fr_k - M_k] \\ \dot{\varphi}_m = \omega_m \\ \dot{\omega}_m = \frac{1}{J_m}[c_m(\varphi_m - \varphi_k) - M_t] \end{array} \right. \quad (2)$$

где M_t – тормозной рекуперативный крутящий момент подводимый к колесу; M_k – тормозной момент, развиваемый колесным тормозным механизмом, зависящий от частоты вращения колеса, при чисто рекуперативном торможении $M_k = 0$.

В случае полного скольжения колеса описывающие вращательное движение колеса и вала ротора также вырождаются в 0. В тормозном режиме в случае частичного скольжения при комплексном торможении транспортного средства с использованием как электродинамического торможения, так и рабочей тормозной системы может возбуждаться «мягкий» автоколебательный процесс. Когда возникает полное скольжение при торможении имеет место возбуждение «жестких» автоколебаний при этом скорость скольжения

заблокированных колес попадает в область, характеризуемую уменьшением силы трения при уменьшении скорости скольжения.

Как показано в работе [23], в зависимости от скорости скольжения шины V_{2sk} период автоколебаний будет меняться в зависимости от периода собственных стационарных колебаний консервативной системы $T_{ст} = \frac{2\pi}{\sqrt{c_m/J_m}}$ до значения $\tau = \frac{\pi}{\sqrt{c_m/J_m}} + \frac{2(R_1-R_2)}{c_m\omega_k}$ при нестационарных колебаниях (здесь R_1, R_2 – сила трения покоя и сила трения движения соответственно). Таким образом, можно сделать вывод, что при возникновении автоколебаний в индивидуальном тяговом электроприводе их частота будет изменяться в зависимости от величины скольжения колеса относительно опорного основания.

Для всех случаев можно также заключить что для поступательного перемещения тела 1 (поддрессоренной части транспортного средства) и вращательного движения тела 7 (ротора электродвигателя) автоколебательные процессы возможны, поскольку критерий Q вырождается в 0.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ РЕЖИМОВ ВОЗНИКНОВЕНИЯ АВТОКОЛЕБАНИЙ

Для выявления возможности возникновения автоколебательных явлений проведены исследования режимов работы тягового электропривода электробуса в различных условиях реальной эксплуатации. Данные регистрировались с штатных датчиков, которыми оборудовано транспортное средство и системы из CAN-шины, а также регистрировались параметры крутящего момента и частоты вращения с помощью динамометрических колес Kistler-Rim.

На рис. 3 показаны результаты разгона электробуса на ровном участке пути до 20 км/ч с последующим комплексным торможением. Из рис. 3 хорошо видно, что как только на тяговых электродвигателях появился рекуперативный момент (отрицательный ток), на графиках изменения момента двигателя и угловых скоростей колес и роторов электродвигателей отчетливо видны

начавшиеся автоколебания, что полностью соответствует полученным аналитическим выводам для случая комплексного торможения. На рис. 4 показаны результаты разгона электробуса с полностью нажатой педалью акселератора до максимальной скорости и с повышенным проскальзыванием колес.

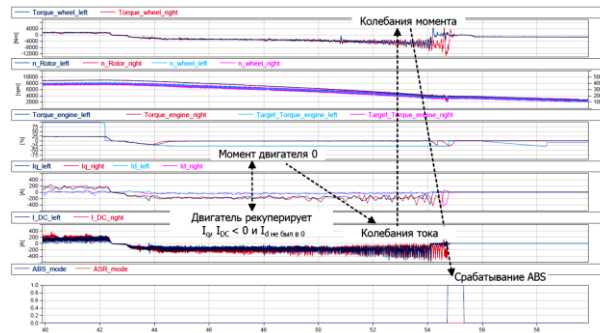


Рис. 3. Изменение крутящих моментов ТЭД, угловых скоростей колес и роторов, а также текущих токов ТЭД во времени при разгоне до 20 км/ч и последующем комплексном торможении

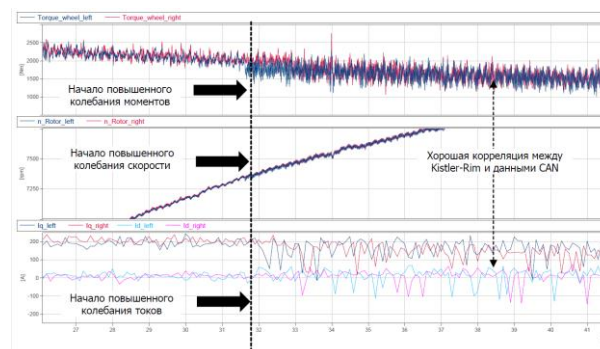


Рис. 4. Изменение крутящих моментов ТЭД, угловых скоростей колес и роторов, а также текущих токов ТЭД во времени при разгоне до максимальной скорости при повышенном проскальзывании колес

На рис. 4 отчетливо видно, что по мере увеличения скорости движения наблюдается рост амплитуд автоколебательных процессов, что объясняется ростом проскальзывания колес на опорном основании. На графиках заметно что колебания момента сопровождаются колебаниями токов I_d и I_q , а следовательно и тока нагрузки, что приводит к возникновению колебаний суммарного тока статора I_s , а также колебаний в системе управления в контуре управления током.

На рис. 5 представлены зависимости крутящих моментов и токов электродвигателей от времени при пробуксовке ведущих колес (на графиках также видно, что срабатывает противобуксовочная система). Видно, что пробуксовка сопровождается зарождением автоколебаний.

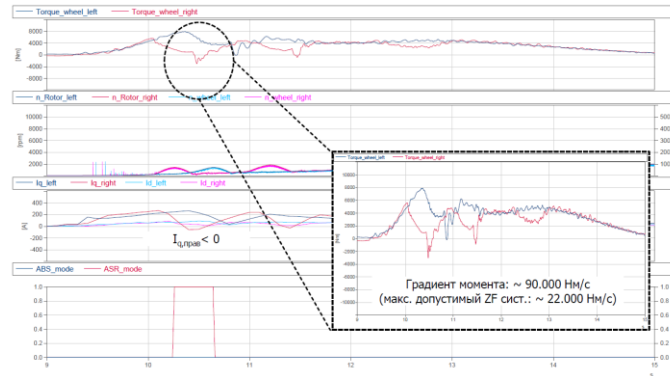


Рис. 5. Зависимости крутящих моментов и тока статора от времени при пробуксовке ведущих колес

На рис. 6 представлен фрагмент реализации крутящих моментов ТЭД при движении по городскому маршруту. Этот график показывает, что автоколебания в индивидуальном тяговом электроприводе присутствуют всегда. Но амплитуда автоколебаний существенно увеличивается в случаях резкого изменения крутящих моментов, что всегда сопровождается повышенным проскальзыванием ведущих колес.

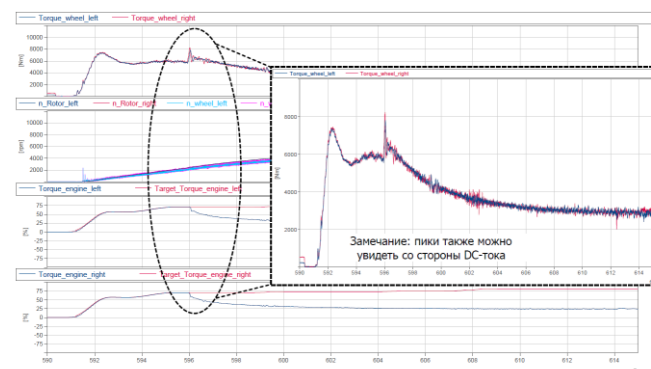


Рис. 6. Фрагмент реализации крутящих моментов ТЭД при движении по городскому маршруту

Для механической трансмиссии и механических частей индивидуального электрического привода особенно опасны автоколебательные процессы при

резком изменении крутящих моментов на ведущих колесах электробуса при разгоне, что приводит в эксплуатации к увеличению динамических нагрузок и как следствие к поломкам зубьев колесных редукторов (рис. 7).



Рис. 7. Поломка зубьев колесного редуктора

IV. ВЫВОДЫ

Методами экспериментальных исследований установлена достоверность аналитических выводов относительно режимов протекания и условий зарождения автоколебательных процессов в индивидуальном тяговом электроприводе. При частичном и полном буксовании как в тяговом, так и в тормозном режиме наблюдаются автоколебания. Особенно опасны автоколебательные процессы при резком изменении крутящих моментов на ведущих колесах электробуса при разгоне и торможении. Амплитуды крутящих моментов при интенсификации автоколебаний увеличиваются в разы, что приводит в эксплуатации к поломкам элементов трансмиссии. Также в данной ситуации колебания момента сопровождаются колебаниями тока статора, что также может превышать допускаемые значения, приводящие к неустойчивой работе, а также к колебаниям в системе управления двигателем.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вильке В.Г., Шаповалов И.Л. Автоколебания в процессе торможения автомобиля. Вестник МГУ. Сер. 1. Математика, механика. 2015. №4. С. 33-39.
2. Светлицкий В.А. Случайные колебания механических систем. М.: Машиностроение, 1976. – 216 с.
3. Кручинин П.А., Магомедов М.Х., Новожилов И.В. Математическая модель автомобильного колеса на антиблокировочных режимах движения. Известия РАН, серия МТТ. 2001, №6, С. 63 – 69.

4. Awrejcewicz J., Dzyubak L., Grehori C. Estimation of chaotic and regular (stick-slip and ship-slip) oscillations exhibited by coupled oscillations with dry friction/ *Nonlinear Dynamics*. 2005. V. 42. №2. P. 383 – 394.
5. Pascal M. Dynamics and stability of a two degrees of freedom oscillator with an elastic stop. *Journal of Computational and Nonlinear Dynamics*. 2006. V.1. №1. P. 94 – 102.
6. Shin K., Brennan M.J., Oh J.-E., Harris C.J. Analysis of disk brake noise using a two-degrees-of-freedom model. *Journal of Sound and Vibration*. 2002. V. 254. №5. P. 837 – 848.
7. Kotiev, G.O., Padalkin, B.V., Kartashov, A.B., Diakov, A.S. Designs and development of Russian scientific schools in the field of cross-country ground vehicles building (2017) *ARNP Journal of Engineering and Applied Sciences*, 12 (4), pp. 1064-1071.
8. Ergin, A.A., Kolomejtseva, M.B., Kotiev, G.O. Antiblocking control system of the brake drive of automobile wheel (2004) *PriboryiSistemyUpravleniya*, (9), pp. 11-13.
9. Aref M.A. Soliman, Mina M.S. Kaldas. An Investigation of Anti-lock Braking System for Automobiles. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.
10. Chendi Sun and Xiaofei Pei. Development of ABS ECU with Hard ware-in-the-Loop Simulation Based on Labcar System. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.
11. Edoardo Sabbioni, Federico Cheli and Vincenzo d'Alessandro. Politecnico di Milano Analysis of ABS/ESP Control Logics Using a HIL Test Bench. SAE International by Warwick University, Thursday, May 05, 2016.
12. Hart P.M. Review of Heavy Vehicle Braking Systems Requirements (PBS Requirements), Draft Report, 24 April 2003.
13. Kurt M. Marshek, Jerry F. Guderman II, Mark J. Jonson. Performance of Anti-Lock Braking System Equipped Passenger Vehicles Part I: Braking as a Function of Brake Pedal Application Force. SAE 2002 World Congress Detroit, Michigan March 4-7, 2002.
14. Кузнецов А.П., Кузнецов С.П., Рыскин Н.М. Нелинейные колебания. – М.: Физматлит, 2002, 292 с.
15. Pacejka H.B. Tyre and Vehicle Dynamics. 2nd ed. – Oxford: Butterworth Heinemann, 2006. – 672 p.
16. Wellstead P.E. Analysis and Redesign of an Antilock Brake System Controller / P.E. Wellstead, L/ Pettit. – IEE Proceedings Control Theory Applications, 1997, - p.p. 413 – 426.
17. Жилейкин М.М. Исследование автоколебательных процессов в зоне взаимодействия эластичной шины с твердым опорным основанием. *Известия высших учебных заведений. Машиностроение*, 2021, № 10, с. 3–15, doi: 10.18698/0536-1044-2021-10-3-15
18. Вибрации в технике: Справочник в 6-ти т. / Ред. совет: В.Н. Челомей [пред.]. – М.: Машиностроение, 1979. – Т.2. Колебания нелинейных механических систем / Под ред. И.И. Блехмана, 1979. 351 с.
19. Крюков Б. И. Вынужденные колебания существенно нелинейных систем. М.: Машиностроение, 1984. – 216 с.
20. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины: Учебник для вузов. В 2 томах, том 2. М.: Издательский дом МЭИ, 2006. – 532 с.
21. Вольдек А.И. Электрические машины: Учебник для студентов высш. техн. учебн. заведений. – 3-е изда., перераб. _ Л.: Энергия, 1978. – 832 с. В 2 томах, том 2.
22. Характеристики электробуса КАМАЗ 6282. [Электронный ресурс]. – Набережные Челны. – Режим доступа <https://kamaz.ru/upload/bus/%D0%AD%D0%BB%D0%B5%D0%BA%D1%82%D1%80%D0%BE%D0%B1%D1%83%D1%81%20КАМАЗ-6282.pdf>(дата обращения 15.10.2022).
23. Wong, J.Y. Theory of Ground Vehicles / J.Y. Wong. – New York: Wiley IEEE, 2001. – 560 p.

ПЕРСПЕКТИВЫ ПРИМЕНЕНИЯ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ТИПА МОТОР-КОЛЕСО В АВТОМОБИЛЕ СТРОЕНИИ¹

Аннотация: Статья посвящена актуальной теме, перспектив применения электродвигателей типа мотор колесо в автомобиле строения. В статье рассмотрены основные действующие прототипы мотор-колес, произведен анализ и выявление перспективы развития.

Ключевые слова: мотор-колесо, электрические машины.

I. ВВЕДЕНИЕ

Электромобили в настоящее время рассматриваются как наиболее перспективный вид транспортного средства, в том числе и в горнодобывающей отрасли. Например, к числу серийных моделей самосвалов, применяемых в карьерных выработках, где используется электродвигатель в качестве тягового агрегата, относятся [2]:

1. Самосвал-электромобиль eDumper с использованием синхронного электродвигателя;
2. Самосвал-электромобиль BYD V60 с использованием мотор-колес;
3. Роботизированный самосвал Volvo HX1;
4. Гибридный роботизированный самосвал БЕЛАЗ-7513R с использованием двигателей постоянного тока в составе мотор-колес;
5. Гибридный самосвал Komatsu IAHV с использованием мотор-колес;

Причиной этому служит ряд их преимуществ: отсутствие вредных выбросов во время движения, низкий шум, а также высокий крутящий момент на старте. Однако, на данный момент электромобили значительно уступают транспортным средствам с двигателями внутреннего сгорания (ДВС) по максимальному запасу хода. В условиях ограниченного запаса емкости аккумуляторных батарей (АБ) на борту электромобиля возникает необходимость в разработке наиболее энергоэффективной, легкой и

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

компактной тяговой установки, с целью увеличения максимального запаса хода электромобиля на одном заряде [4].

Мотор-колеса являются конкурентоспособным аналогом классической трансмиссии, так как они помогают избежать использования дополнительных передаточных механизмов, освобождают место в подкапотном пространстве и равномерно распределяют вес транспортного средства. При этом, одной из особенностей использования мотор-колес является необходимость отказа от коробки передач. В этом случае подход к разработке тяговой установки с использованием мотор-колес значительно ограничен в выборе силовых агрегатов: механическая характеристика мотора должна позволять транспортному средству работать в широком диапазоне скоростей без потери крутящего момента на валу. [1] Для установки электромотора на вал колеса напрямую без передаточных механизмов используют электродвигатели с постоянными магнитами и осевым магнитным потоком, номинальные параметры которых соответствуют режимам движения транспортного средства. Однако, данный тип электродвигателей, сравнении со стандартной конструкцией электродвигателя с радиальным магнитным потоком, несмотря на свою высокую эффективность, является более дорогим в производстве. Использование многоступенчатой механической трансмиссии также позволяет добиться необходимых динамических параметров системы в пределах номинальных значений электромотора, при этом разработка и эксплуатация таких механизмов также является трудоемким и ресурсозатратным процессом.

II. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ТЕХНОЛОГИЙ И ПРОТОТИПОВ

Мотор-колеса являются конкурентоспособным аналогом классической трансмиссии, так как они помогают избежать использования дополнительных передаточных механизмов, освобождают место в подкапотном пространстве и равномерно распределяют вес транспортного средства. При этом, одной из особенностей использования мотор-колес является необходимость отказа от коробки передач. В этом случае подход к разработке тяговой установки с

использованием мотор-колес значительно ограничен в выборе силовых агрегатов: механическая характеристика мотора должна позволять транспортному средству работать в широком диапазоне скоростей без потери крутящего момента на валу. Для установки электромотора на вал колеса напрямую без передаточных механизмов используют электродвигатели с постоянными магнитами и осевым магнитным потоком, номинальные параметры которых соответствуют режимам движения транспортного средства. Однако, данный тип электродвигателей, в сравнении со стандартной конструкцией электродвигателя с радиальным магнитным потоком, несмотря на свою высокую эффективность, является более дорогим в производстве. Использование многоступенчатой механической трансмиссии также позволяет добиться необходимых динамических параметров системы в пределах номинальных значений электромотора, при этом разработка и эксплуатация таких механизмов также является трудоемким и ресурсозатратным процессом.

Мотор-колеса, подразумевающие использование передаточных механизмов с одной ступенью без возможности изменения передаточного числа являются наиболее эффективным решением, так как цена конечной системы, а также затраты на обслуживание являются минимальными по сравнению с вышеобозначенными конструкциями. Однако, недостатком такого решения является необходимость расширения диапазона работы электромотора в несколько раз выше номинального значения, что подразумевает использование электродвигателя в режиме ослабленного поля. Из вышесказанного следует, что для работы в составе мотор-колес могут быть использованы электродвигатели, параметры которых соответствуют следующим требованиям:

1. Высокий крутящий момент на низких скоростях;
2. Широкий диапазон регулирования скорости;
3. Высокий коэффициент удельной мощности.

Низкий вес мотора наиболее важный параметр, необходимый для достижения его высоких динамических характеристик вследствие уменьшения общей неподрессоренной массы электромобиля. Таким образом отношение

КПД мотора к его весу основной критерий выбора электромотора. Электродвигатели, соответствующие вышеобозначенным критериям, представлены следующими типами:

1. Асинхронный электродвигатель;
2. Синхронный двигатель с постоянными магнитами;
3. Бесщеточный двигатель постоянного тока;
4. Вентильный реактивный электродвигатель.

Плюсами использования мотор-колеса в автомобиле строения являются:

– Эффективность передачи энергии от двигателя к колесу, так как в привычной для нас трансмиссии крутящий момент тратится в больших объемах на раскрутку инерционных масс, а также на трение в зацепление зубчатых колес, на перемешивание вала, на качение подшипников и т.д. и чем больше трансмиссионных компонентов в цепи, тем ниже КПД.

– Основным преимуществом индивидуального электрического привода является масса конструкции. Так как при использовании электрического привода, появляется возможность исключить трансмиссионные компоненты и множество тяжелых передаточных механизмов между двигателем и колесом.

– Доступность крутящего момента во всем диапазоне, электроприводам свойственно иметь максимальную характеристику крутящего момента начиная с самого начала работы, так же снижения ее при достижении значения максимальной мощности у ДВС, что дает отменную динамику.

– Открываются значительные возможности при компоновке транспортного средства, освобождается большое пространство за счет исключения узлов конструкции.

На рисунке 1.1 изображено мотор колесо разработанное Michelin, а также его составные части:



Рис. 1. Michelin Active Wheel

В 2008 году компания Michelin произвела революцию в сфере машиностроения, представив свой новый концепт Michelin Active Wheel. Источником энергии для двигателя, объединенного с колесом, могут быть только батареи (литий-ионные, литий-полимерные, алюминий-ионные и др.). В любом случае эти источники энергии обладают двумя значительными преимуществами: отсутствие вредных выбросов и непревзойденный уровень комфорта. Действительно, оборудованный таким образом автомобиль абсолютно не выделяет в атмосферу газов с парниковым эффектом. Наряду с этим, электродвигатель работает бесшумно, что полезно как для пассажиров автомобиля, так и особенно для окружающей среды [8].

Достоинством Michelin Active Wheel является новый, ранее недостижимый уровень экологичности и рабочих характеристик. Динамические характеристики вместе с системой подвески устанавливают новые стандарты в области управляемости и уровня комфорта. С Michelin Active Wheel автомобиль имеет не механическую, а электрическую подвеску. Эта уникальная система характеризуется чрезвычайно высокой скоростью реакции. Продольные и поперечные перемещения кузова корректируются автоматически.

Michelin Active Wheel позволяет упростить концепцию автомобиля. Здесь не используются механические комплектующие традиционного автомобиля. На автомобилях, оснащенных Michelin Active Wheel, не нужны коробка

передач, сцепление, трансмиссионный вал, дифференциал, амортизаторы и т.п. – все это снижает вес автомобиля и уменьшает потребность в энергии. В результате, достигается такой запас хода, который соответствует ожиданиям автомобилистов. Michelin Active Wheel – это настоящий технологический прорыв. Эта система является адекватным решением основных проблем дорожного транспорта, таких как энергия (количество, разнообразие, стоимость), выбросы газов с парниковым эффектом, городские пробки и загрязнение.

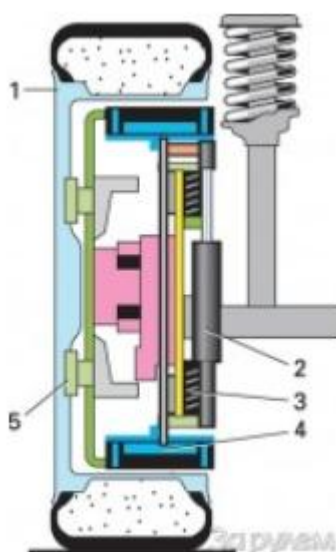


Рис. 2. Мотор-колесо eCorner

Разрез колеса eCorner: 1 - обод, 2 - встроенный электродвигатель, 3 - тормозной механизм EWB, 4 - активная подвеска, 5 - электропривод рулевого управления

Электродвигатель в eCorner располагается непосредственно на ободе колеса и может работать не только при разгоне, но и при торможении, регенерируя электроэнергию и заряжая батареи, представлен на рисунке 2. При этом специалисты компании уверяют, что коэффициент полезного действия (КПД) у подобного электродвигателя может достигать 96%. Для сравнения КПД самых совершенных бензиновых и дизельных двигателей не превышает 45%, а перспективные гибридные силовые установки будущего смогут достигнуть только 85% КПД.

В случае, когда тормозного момента двигателя недостаточно, остановить машину помогут дисковые тормоза с электронным управлением EWB. Колодки здесь прижимаются к диску не гидравлическими цилиндрами, как на обычных машинах, а двумя электромоторами. Такая конструкция позволяет управлять торможением каждого колеса автономно и избавляет автомобиль от громоздкой и ненадежной единой тормозной системы.

Подвеска у eCorner также встроена внутрь колеса. Она снабжена датчиками, которые постоянно следят за давлением в шинах и определяют уровень сцепления колеса с поверхностью. В соответствии с показателями этих датчиков электроника настраивает подвеску так, чтобы автомобиль сохранял устойчивость и высокую плавность хода. При этом, подвеска eCorner снабжена компактными электродвигателями, которые поворачивают колеса вокруг вертикальной оси независимо друг от друга. Например, все четыре колеса автомобиля можно повернуть в одну сторону, и машина поедет боком.

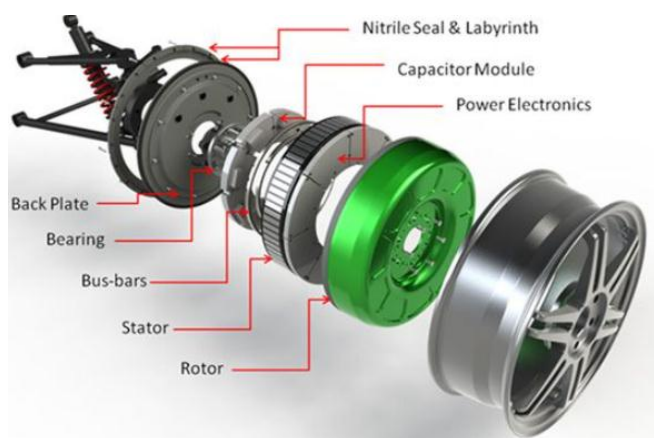


Рис. 3. Мотор-колесо Protean Electric

Каждое мотор-колесо оснащается встроенным инвертором и процессором, который через шину CAN связан с блоком управления системой System ECU. System ECU синхронизирует работу всех четырех мотор-колес шасси. В случае отказа одного, двух и даже трех колес, компьютер мгновенно перераспределяет нагрузку на оставшиеся. При этом электромобиль теряет в динамике, но сохраняет управляемость на нормальном уровне.

Процесс торможения и бленд механического и электрического сопротивления управляется встроенным в System ECU внешним модулятором производства Continental или Bosch. Когда водитель жмет на тормоз, контроллер тормозной системы определяет возможность торможения за счет переключения мотор-колес в режим генератора. Если этого будет достаточно, то механические тормоза не активируются, позволяя генератору восстановить максимальное количество электричества из кинетической энергии шасси. Механические тормоза при необходимости обеспечивают дополнительное тормозное усилие или полностью заменяют электрические компоненты при их отказе [6].

Инженеры Protean утверждают, что с точки зрения управляемости электромобиль с системой привода Protean Drive на порядок надежнее конкурентов – каждое его колесо работает в индивидуальном режиме в зависимости от внешних условий и нагрузки. Кроме того, эффективность регенеративного торможения в мотор-колесах также намного выше, чем в электромобилях с ведущим мотором и традиционными механическими приводами. Критически важный аспект применения мотор-колес – рациональное использование энергии аккумулятора и, как следствие, повышение запаса хода электромобиля на 50%.

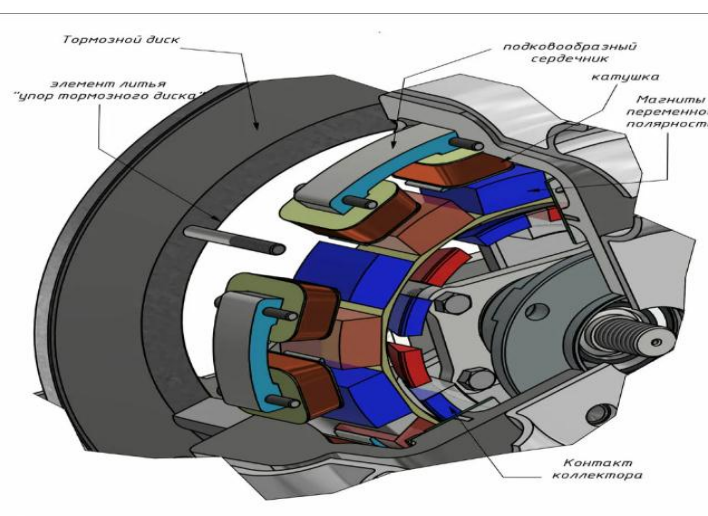


Рис. 4. Мотор-колесо Шкондина

Мотор-колесо Шкондина, представленное на рисунке 5, содержащее неподвижно установленный двигатель, редуктор, солнечная шестерня которого связана с валом двигателя, коронная - со ступицей колеса, первую и вторую сателлитную шестерни, связанные непосредственно с солнечной и коронной шестернями соответственно, причем вторая закреплена на сателлитной оси, втулку, установленную на этой оси с фланцем с одной стороны и упором с другой, между которыми установлена посредством шлицев вторая сателлитная шестерня, а первая - между ней и фланцем втулки и выполнена в виде зубчатых дисков, свободно установленных на втулке и подпружиненных друг относительно друга для прижатия их торцовыми поверхностями соответственно к второй сателлитной шестерне и фланцу втулки. Наличие редуктора снижает надежность и безопасность довольно сложной конструкции. Однако указанная конструкция, кроме всех недостатков, присущих асинхронной машине, имеет наличие сложной системы для управления режимами работы и дорогих громоздких и высоковольтных источников переменного напряжений (для автономных средств) [7].

Мотор-колесо может быть выполнено не только с двумя, но и с большим числом магнитопроводов индуктора (с постоянными магнитами) и магнитопроводов (с группами катушек), что приводит к увеличению мощности и улучшению других параметров. При этом выбирается соответствующее число токосъемников и распределительных коллекторов.



Рис. 5. Мотор-колесо 415 НИЛД

Российская компания "Центр исследования силовых и энергетических установок" представила свою разработку мотор-колеса. Мотор-колесо 415 НИЛД предназначено для применения в качестве тягового привода перспективных гибридных грузовых автомобилей, автобусов, тягачей и вездеходов. Мотор-колесо может использоваться в двух опциях в качестве поворотного и неповоротного колеса.

Мотор-колесо 415 НИЛД, представлен на рисунке 6 – это герметичная, маслonaполненная, глубоко интегрированная конструкция, объединяющая, функции колеса, тягового электродвигателя, планетарного редуктора и ленточного тормоза с гидроприводом. Питание осуществляется переменным электротоком от вентильного источника тока. Алгоритм управления поддерживает следующие основные режимы:

- движение вперед с регулированием мощности;
- движение назад с регулированием мощности;
- рекуперативное торможение;
- основное торможение электродвигателем;
- резервное торможение ленточным тормозом;
- движение накатом; движение вперед с заданной постоянной частотой вращения;
- движение назад с заданной постоянной частотой вращения.

Задание режимов работы осуществляется альтернативно от бортового компьютера или органов управления. Номинальная мощность 30 кВт, КПД 90%, Диапазон частот вращения 0-1000 об. Мин., максимальный крутящий момент 2570 Нм, крутящий момент электродвигателя 500 Нм, питающее напряжение 300в, масса 60 кг, диапазон рабочих температур от минус 50 град. до плюс 50 град. Традиционные и широко-распространенные мотор-колеса: Это чаще всего синхронные машины PMSM или BLDC (вентильные), реже коллекторные, редко но встречаются асинхронные двигатели. Ротор неподвижен, на нем расположена обмотка. Статор, наоборот, совмещен с ободом колеса. На подвижной части мотор-колеса зачастую размещают

неодимовые магниты. Мотор-колеса с двигателем BLDC и синхронные PMSM несколько отличаются друг от друга при внешней схожести, двигатели BLDC имеют лучший крутящий момент при трогании. Отличаются они формой обратной ЭДС, наведенной в катушках при вращении ротора. Бесщеточный двигатель постоянного тока BLDC имеет трапециевидную обратную ЭДС. Синхронный двигатель с постоянными магнитами PMSM имеет синусоидальную обратную ЭДС. Их объединенное название PMM - двигатели с постоянными магнитами, имеют трехфазное управление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Вейнгер, А. Регулируемые электроприводы переменного тока: Конспект вводных лекций / А. Вейнгер // Москва. — 2009.
2. Обзор транспорта с электропитанием в фокусе развития горнодобывающих предприятий / В. А. Черепанов [и др.] // Проблемы недропользования. — 2019. — т. 1, 20)
3. Овчинников, И. Привод легких транспортных средств на основе дискового вентильного электрического двигателя / И. Овчинников, Н. Леви // Научно-технический вестник информационных технологий, механики и оптики. — 2007. — с 44.
4. Попов, В. А. Тяговый электропривод карьерных самосвалов БелАЗ / В. А. Попов, В. Н. Кислов, И. Н. Паскарь // Природные и интеллектуальные ресурсы Сибири. Сибресурс. — 2018. — с. 711—1.
5. Driving Control Technologies of New High-Efficient Motors / С.-М. Liaw [et al.] // Electromechanical Devices and Machines. — IntechOpen, 2019.
6. IEC 60349-1:2010* Electric traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles - Part 1: Machines other than electronic converter-fed alternating current motors (Электротяга. Вращающиеся электрические машины для рельсового и безрельсового транспорта. Часть 1. Машины, кроме двигателей переменного тока с питанием от электронных преобразователей);
7. IEC 60349-2:2010 Electric traction - Rotating electrical machines for rail and road vehicles - Part 2: Electronic converter-fed alternating current motors (Электротяга. Вращающиеся электрические машины для рельсового и безрельсового транспорта. Часть 2. Двигатели переменного тока с питанием от электронных преобразователей).

ЛИНЕЙНЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ МАШИНЫ ДЛЯ УСТРОЙСТВ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКОЙ СЕПАРАЦИИ

Аннотация: В данной работе рассматриваются линейные индукционные машины, работающие в составе электродинамических сепараторов, предназначенных для извлечения цветных металлов из потока неметаллов. Сопоставлены варианты исполнения линейных индукторов в сепараторах при подаче материалов по ленте конвейера. Показана перспективность применения индукторов со встречно бегущими магнитными полями и индукторов модульного исполнения. Приведены примеры расчета траекторий движения сепарируемых частиц, рассчитанные по методике, разработанной в Уральском федеральном университете.

Ключевые слова: линейные индукционные машины, устройства электродинамической сепарации, варианты индукторов, траектории движения проводящих частиц.

I. ВВЕДЕНИЕ

В последние годы в нашей стране повышенное внимание уделяется развитию производств по промышленной переработке твердых отходов производства и потребления. Стратегия развития этой отрасли предполагает максимальную степень извлечения из отходов отдельных компонентов, пригодных для использования в качестве вторичного сырья, а также развитие отечественной технологической и машиностроительной базы, обеспечивающей отрасль переработки отходов необходимым оборудованием, обладающим также высоким экспортным потенциалом [1]. Цветные металлы и сплавы, находящиеся в отходах, являются наиболее ценной утилизируемой фракцией. Для их извлечения из отходов в мировой практике используются устройства электродинамической (вихретоковой) сепарации [2]-[7]. С помощью электродинамических сепараторов решаются следующие задачи:

- извлечение лома цветных металлов из потоков твердых промышленных или коммунальных отходов (сыпучих многокомпонентных смесей);
- отделение металлических фракций от неметаллических и получение селективных концентратов цветных металлов и сплавов при обработке сложных отходов и лома электротехнических и электронных изделий;

- индукционная сортировка лома цветных металлов по видам и маркам сплавов при подготовке их к металлургическому переделу.

При обработке твердых отходов чаще всего используются сепараторы с бегущим магнитным полем, возбуждаемым вращающимися индукторами на основе высококоэрцитивных постоянных магнитов, либо трехфазными линейными индукторами. В первом случае индуктор встраивается в шкив конвейера, подающего отходы. Такой сепаратор отличается малым энергопотреблением, но требует подачи отходов монослоем, что ограничивает производительность установок. Сепараторы второго типа могут работать в составе высокопроизводительных технологических линий. При этом линейные индукторы легко вписываются в действующие установки. В то же время такие сепараторы отличаются повышенным энергопотреблением, поскольку имеют открытую магнитную систему (при использовании односторонних линейных индукторов), или большой рабочий зазор (в случае двухстороннего индуктора).

Потребность в электродинамических сепараторах и необходимость устранения указанных недостатков обуславливают актуальность их исследования. В данной статье показаны некоторые пути совершенствования сепараторов на основе линейных индукционных машин (ЛИМ). В основе работы многолетние исследования и разработки, проводимые в Уральском федеральном университете.

II. ОСНОВНЫЕ ПОЛОЖЕНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ

Наиболее распространенные конструктивные схемы электродинамических сепараторов на основе ЛИМ представлены на рис. 1. В первом случае (рис. 1-а) линейные индукторы устанавливаются под лентой конвейера, подающего обрабатываемые материалы. При этом взаимодействующие с бегущим магнитным полем проводящие частицы металла выносятся за пределы конвейера в поперечном направлении. Благодаря этому проводящие и непроводящие частицы перемещаются в разные приемники продуктов разделения. Такая конструкция целесообразна при

извлечении металлических включений из потока неметаллов (например, из дробленого автомобильного лома или из потока коммунальных отходов). Во втором случае (рис. 1-б) подача сепарируемых материалов осуществляется по наклонной плоскости. В зависимости от физических свойств разделяемых частиц в активной зоне сепаратора формируются их разные траектории движения. В результате этого частицы могут собираться в разные приемники продуктов разделения. Сепаратор с наклонной плоскостью предпочтителен при индукционной сортировке цветных металлов и сплавов (например, при обработке дробленого лома электротехнических и электронных изделий).

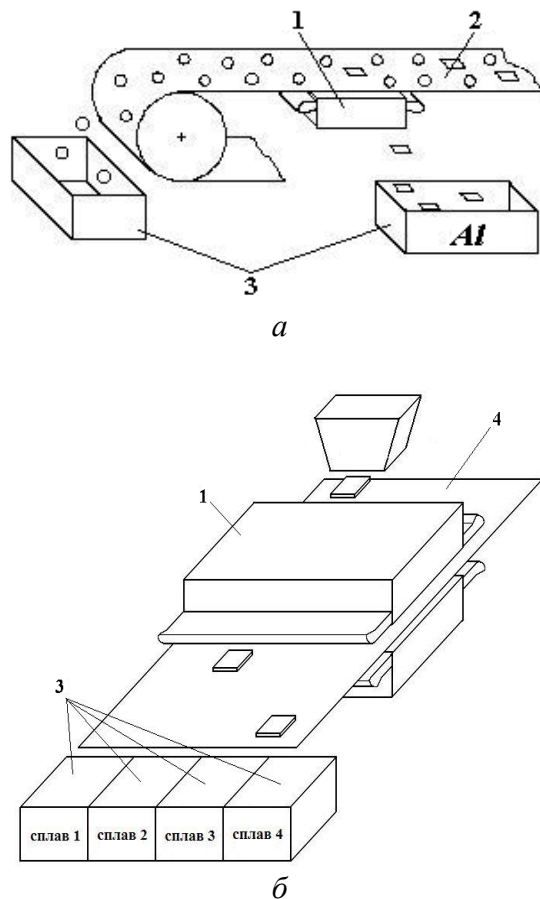


Рис. 1. Основные конструктивные схемы электродинамических сепараторов на основе ЛИМ:

- 1 – линейные индукторы, 2 – конвейер,
3 – приемники продуктов разделения, 4 – плоскость подачи

Рабочие процессы в показанных вариантах сепараторов имеют свои особенности, в том числе, связанные с различием решаемых с их помощью

технологических задач. Однако, основные положения, обсуждаемые в данной работе, могут в равной мере относиться к обоим вариантам. В дальнейшем особенности работы сепараторов на основе ЛИМ и предлагаемые технические решения иллюстрируются на примере первого варианта конструкции (с подачей материалов по ленте конвейера).

Основной особенностью рассматриваемых ЛИМ является то, что параметры их вторичных элементов, роль которых выполняют извлекаемые частицы металлов, задаются технологической задачей и не являются предметом выбора. Наиболее значимым фактором является ограниченность размеров такого вторичного элемента. Например, при сепарации дробленого лома электротехнических и электронных изделий размеры частиц металлов оказываются существенно меньше полюсного деления индуктора ($b < \tau$). Обусловленное этим перераспределение вторичных токов приводит к тому, что с уменьшением относительного размера (b / τ) удельное электромагнитное усилие Fm снижается (Fm – отношение электромагнитного усилия, действующего на частицу, к ее массе, Н/кг или м/с²) [7]-[8].

В то же время при разработке линейных индукторов электродинамических сепараторов возможно использование технических решений, которые в традиционных электрических машинах не применяются. В ходе исследований сепараторов на основе ЛИМ в Уральском федеральном университете выявлено несколько таких решений, позволяющих повысить эффективность сепарации.

Рассмотрим специфику работы электродинамического сепаратора на основе ЛИМ при расположении линейного индуктора под лентой конвейера (рис. 1-а). Извлекаемые из потока металлические частицы в рабочей зоне такого сепаратора участвуют в двух движениях: со скоростью V_k в направлении движения конвейера и ускоренно под действием электромагнитной силы $F_{эм}$ в поперечном направлении, как показано на рис. 2-а. На рисунке показан самый неблагоприятный случай, когда частица металла должна преодолеть в поперечном направлении расстояние, равное ширине ленты конвейера V_k .

Время пребывания частицы над индуктором определяется шириной индуктора $L_{и}$ и скоростью конвейера $V_{к}$. Например, в электродинамическом сепараторе КМ-203М, созданном при участии УрФУ для извлечения цветных металлов из потока твердых коммунальных отходов [6], при скорости конвейера $V_{к} = 1$ м/с и ширине линейного индуктора $L_{и} = 0,35$ м время пребывания частиц в зоне сепарации, а, следовательно, и время взаимодействия ее с магнитным полем составляет $t_{и} = 0,35$ с. Как показали промышленные испытания сепаратора, при ширине ленты конвейера $B_{к} = 1,2$ м надежно извлекаются только алюминиевые частицы крупностью более 40 мм (частица 1 на рис. 2-а). Частицы алюминия меньшей крупности, а также частицы металлов с меньшей электропроводностью за указанное время не выходят за пределы конвейера и выносятся за пределы зоны сепарации (частицы 2 и 3 на рис. 2-а), что обуславливает потери цветных металлов, при испытаниях составившие 20-25%.

Повышения степени извлечения металлических частиц из потока неметаллов можно добиться за счет увеличении ширины индуктора $L_{и}$, как показано на рис. 2-б, либо установкой дополнительного индуктора (как было сделано в случае сепаратора КМ-203М). Однако в этих случаях растет потребляемая из сети мощность S (в сепараторе КМ-203М мощность каждого индуктора составила $S = 112$ кВА [6]).

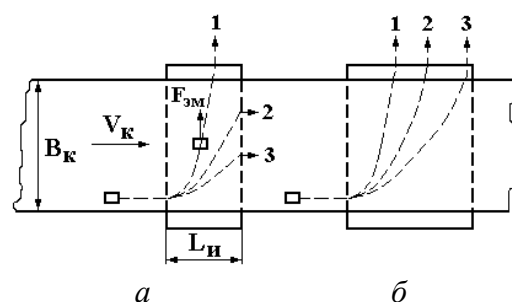


Рис. 2. Схема движения сепарируемых частиц в активной зоне индуктора

Одним из путей увеличения степени извлечения металла без роста энергопотребления является поворот линейного индуктора по отношению к поперечной оси, как показано на рис. 3-а. В этом случае время пребывания

частиц в активной зоне будет определяться не шириной индуктора $L_{и}$, а величиной $(B_k \cdot \operatorname{tg} \gamma + L_{и} / \cos \gamma)$. Например, в случае сепаратора КМ-203М при ширине ленты конвейера $B_k = 1,2$ м, длине индуктора $L_{и} = 1,488$ м и угле поворота $\gamma = 20^\circ$, время пребывания частиц над индуктором может увеличиться до $t_{и} = 0,8$ с, что равносильно увеличению ширины индуктора. Однако, вместе с этим снижается составляющая электромагнитной силы, направленная поперек конвейера (при угле $\gamma = 20^\circ$ получаем $F_{эм} \cdot \cos \gamma = 0,94 F_{эм}$), и увеличивается нежелательная продольная ее составляющая, поэтому возможности предлагаемого способа ограничены.

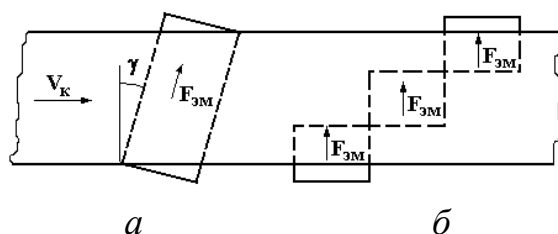


Рис. 3. Варианты электродинамических сепараторов с поворотом индуктора (а) и с модульным исполнением ЛИМ (б)

Указанных недостатков лишен вариант электродинамического сепаратора с модульным исполнением ЛИМ, представленный на рис. 3-б. При этом каскадное расположение модулей с их смещением в направлении движения частиц позволяет получить эффект, подобный увеличению ширины индуктора. Дополнительным достоинством модульной конструкции является возможность устранения или снижения несимметрии фазных токов ЛИМ. При использовании в таком сепараторе трех одинаковых модулей ЛИМ и транспозиции фаз можно добиться полной симметрии токов. Это благоприятствует компенсации реактивной энергии и существенному снижению энергопотребления (например, в сепараторе КМ-203М при полной потребляемой мощности индуктора $S = 112$ кВА его активная мощность составляла всего $P = 5,6$ кВт).

На рис. 4 представлены варианты ЛИМ электродинамических сепараторов, в которых используются встречно бегущие магнитные поля [9],

[10]. При использовании одного индуктора (рис. 4-а), обмотки которого формируют разбегающиеся магнитные поля, сепарируемые частицы металлов перемещаются от центра ленты к ее краям и собираются по обе стороны от конвейера.

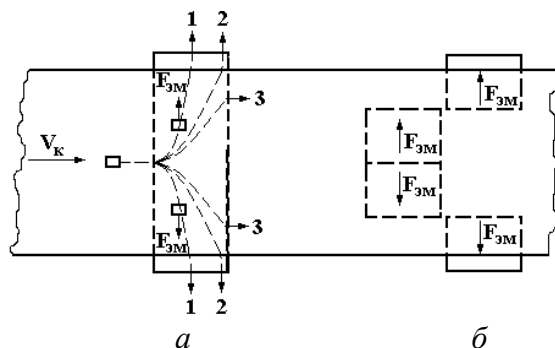


Рис. 4. Варианты электродинамических сепараторов с двухсторонним выходом металла

Схематично принцип формирования разбегающихся магнитных полей показан на рис. 5. Необходимо отметить, что из шести вариантов схем обмоток, которые могут создавать встречно бегущие магнитные поля для устройств электродинамической сепарации можно использовать только схему, показанную на рис. 5. В случаях других вариантов схем обмоток в центре индуктора возникают искажения магнитного поля, приводящие к образованию «мертвой зоны» (области, в которой электромагнитное усилие отсутствует, либо существенно снижается), что приводит к пропуску частиц металла.

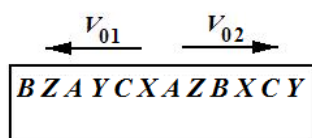


Рис. 5. Линейный индуктор с разбегающимися магнитными полями, обеспечивающий двухсторонний выход металла в электродинамических сепараторах

Вариант ЛИМ, представленный на рис. 4-б, в котором центральный модуль индуктора с разбегающимися магнитными полями дополнен ступенчато расположенными модулями, также обеспечивает двухсторонний выход металла и объединяет достоинства предыдущих вариантов сепараторов.

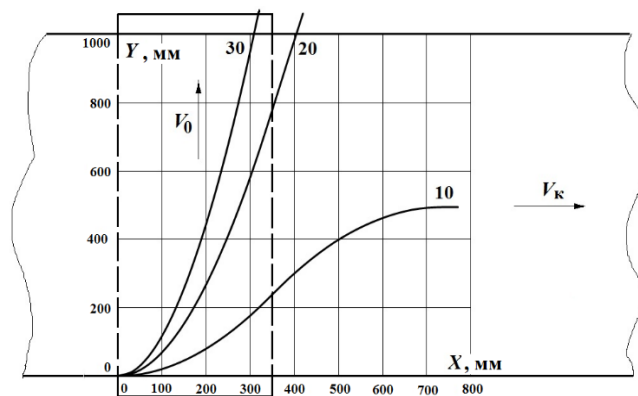
При разработке электродинамических сепараторов на основе ЛИМ необходимо оценивать результаты сепарации уже на стадии проектирования. Такая оценка может выполняться по методике, разработанной в УрФУ.

На первом этапе определяются электромагнитные силы, действующие на частицы металлов в активной зоне ЛИМ. Расчет проводится по методике, сочетающей определение вторичных токов и электромагнитных сил по аналитической модели [7], [11] и расчеты магнитных полей и электромагнитных сил численными методами (метод конечных элементов), используемыми моделирование ЛИМ в двухмерной постановке. Такой подход обеспечивает учет при расчетах основных особенностей, рассматриваемых машин (сложное распределение магнитного поля в рабочей зоне и ограниченность размеров вторичного элемента), не прибегая к использованию трехмерных моделей, требующих при расчетах больших вычислительных ресурсов.

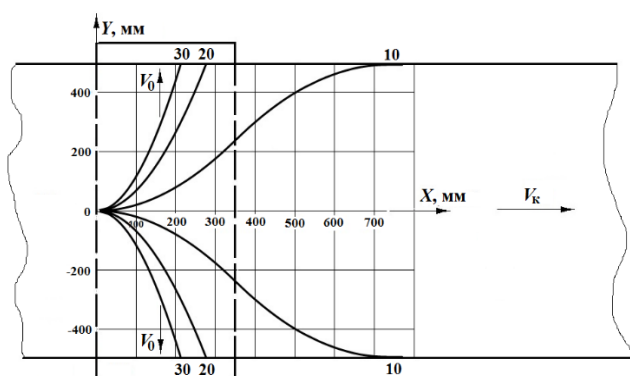
На втором этапе на основе решения уравнений движения частиц металла с учетом действия на них совокупности электромагнитных и механических сил определяются траектории движения частиц в зоне сепарации. Для учета зависимости электромагнитных сил от скорости движения и положения частицы в активной зоне используется разбиение зоны над индуктором на участки малых размеров. Подобное же разбиение выполняется и для зоны сепарации за индуктором, где частицы движутся по инерции. Это позволяет перейти от решения нелинейного уравнения движения к последовательному решению линейных уравнений для отдельных участков. При этом усилия корректируются при переходе с участка на участок по значениям скорости и координаты частицы, полученным на предыдущем участке. Для автоматической корректировки усилий в программе расчетов, реализованной в пакете Mathcad, используются аппроксимации механической характеристики ЛИМ и распределения электромагнитного усилия по длине индуктора полиномиальными зависимостями от относительной скорости частицы (V_2/V_0 , где $V_0 = 2\tau f$ – скорость бегущего магнитного поля) и

положения частицы над индуктором (координаты Y). Такой подход, предложенный и апробированный ранее в [12], [13], соответствует кусочно-линейной аппроксимации траекторий.

Примеры расчетных траекторий движения частиц в зоне сепарации показаны на рис. 6. Основные данные установки, подобной электродинамическому сепаратору КМ-203М [6], выбранной для расчетов: ширина ленты конвейера $V_k = 1,0$ м, скорость подачи материала $V_k = 1,0$ м/с, ширина индуктора $L_i = 0,35$ м, полюсное деление $\tau = 0,186$ м и коэффициент сопротивления движению $k_{тр} = 0,4$. Значения удельных электромагнитных усилий ($F_m = 10, 20$ и 30 Н/кг), показанные цифрами на графиках, соответствуют достигаемым в сепараторе КМ-203М на алюминиевых частицах крупностью от 30 до 60 мм (например, при крупности частиц 40 мм для деформируемых сплавов алюминия достигаются удельные электромагнитные усилия $F_m = 17-20$ Н/кг, а для литейных сплавов алюминия – $F_m = 10-15$ Н/кг). Результаты расчета траекторий в сепараторе с односторонним выходом металлических частиц, представленные на рис. 6-а, объясняют трудности с извлечением из потока отходов алюминиевых частиц крупностью менее 40 мм, обнаруженные при испытаниях сепаратора КМ-203М. В то же время при использовании ЛИМ с разбегающимися магнитными полями, обеспечивающими двухсторонний выход сепарируемых частиц (траектории на рис. 6-б), надежно будут извлекаться алюминиевые частицы крупностью более 30 мм для деформируемых сплавов и крупностью более 40 мм – для литейных сплавов.



a



б

Рис. 6. Траектории движения проводящих частиц в сепараторе с односторонним (*a*) и двухсторонним (*б*) выходом металла

В целом, результаты расчета траекторий движения проводящих частиц в зоне сепарации хорошо согласуются с данными экспериментальных исследований и промышленных испытаний. Это позволяет моделировать различные варианты электродинамических сепараторов на основе ЛИМ, теоретически исследовать их параметры и характеристики и проектировать установки в целом (например, оптимизировать расположение модулей индуктора ЛИМ в варианте конструкции сепаратора, показанной на рис. 3-б).

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Выполненные исследования показывают, что применение нетрадиционных технических решений при разработке линейных индукционных машин электродинамических сепараторов позволяет существенно улучшить их функциональные и энергетические характеристики.

Разработанные в Уральском федеральном университете методики расчета линейных индукционных машин и электродинамических сепараторов на их основе, а также созданные в университете опытные установки могут служить базой для дальнейшего совершенствования технологий и оборудования электродинамической сепарации.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стратегия развития промышленности по обработке, утилизации и обезвреживанию отходов производства и потребления на период до 2030 г. (утв. Распоряжением Правительства РФ от 25.01.2018 № 84-п). [Электронный ресурс]. – URL: http://www.consultant.ru/document/cons_doc_LAW_289114/
2. Schloemann E. Eddy current techniques for segregating nonferrous metals from waste // Resources, Conservation and Recycling. 1982, No. 5, pp. 149-162. Doi: 10.1016/0361-3658(82)90024-8
3. Lungu M., Rem P. Eddy-current separation of small nonferrous particles by a single-disk separator with permanent magnets. IEEE Transactions on Magnetics, 2003, No. 39(4), 2062–2067. Doi:10.1109/tmag.2003.812724.
4. Smith Y. R., Nagel J. R., Rajamani R. K. Eddy current separation for recovery of non-ferrous metallic particles: A comprehensive review. Minerals Engineering, 2019, issue 133, 149–159. Doi: 10.1016/j.mineng.2018.12.025.
5. Коняев А. Ю. Расчет и исследование электродинамических сепараторов на основе линейных асинхронных двигателей // Электротехника. 1994, № 2, с. 59-63.
6. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, А.Ю. Коняев и др. // Промышленная энергетика. 2001, № 6, с. 16-19.
7. Устройства для электродинамической сепарации лома и отходов цветных металлов / А.А. Патрик, Н.Н. Мурахин, А.Ю. Коняев и др. // Промышленная энергетика. 2001, № 6, с. 16-19.
8. Оценка характеристик линейных индукционных машин при ограничении размеров вторичного элемента / А.Ю. Коняев, И.А. Коняев, Н.Е. Маркин, С.Л. Назаров // Электричество. 2010, № 4, с. 32-36.
9. Линейные индукционные машины со встречно бегущими магнитными полями для энергоэффективных технологий / А.Ю. Коняев, Б.А. Сокунов, Ж.О. Абдуллаев, Е.Л. Швыдкий // Промышленная энергетика. 2017, № 4, с. 2-7.
10. Применение линейных индукторов со встречно бегущими магнитными полями в электродинамических сепараторах / А.Ю. Коняев, Ж.О. Абдуллаев, М.Е. Зязев, Д.Н. Багин // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления, 2019, № 32, с. 22-37
11. Коняев А.Ю., Назаров С.Л. Исследования характеристик электродинамических сепараторов на основе двумерной модели // Электротехника, 1998, № 5, с. 52-57.
12. Анализ электромеханических процессов, определяющих эффективность работы электродинамического сепаратора / Ж.О. Абдуллаев, А.Ю. Коняев, Д.Н. Багин, С.Л. Назаров // Промышленная энергетика, 2015, № 7, с. 48-53.
13. Konyayev A.Y., Bagin D.N. Modeling an Electrodynamical Separator Based on a Linear Inductor. Russian Electrical Engineering. 2018, volume 89, No 3, pp. 168-173. DOI: 10.3103/S1068371218030100.

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИК ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ГЕНЕРАТОРОВ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ¹

Аннотация: В статье рассмотрены вопросы проектирования линейных электрических генераторов с постоянными магнитами для разных конструктивных исполнений магнитных систем. Приведенные рекомендации основаны на численном компьютерном моделировании ряда типоразмеров конструкций и обобщены по типу используемых постоянных магнитов в магнитной системе. Адекватность компьютерных моделей подтверждена экспериментально.
Ключевые слова: линейный электрогенератор, постоянные магниты, рекомендации к проектированию, проектный расчет.

I. ВВЕДЕНИЕ

Линейный электрический генератор с постоянными магнитами (ЛГПМ) представляет собой специальную электрическую машину, где подвижный элемент (ПЭ), в соответствии с гармоническим законом изменения координаты перемещения, совершает возвратно-поступательные движения. В настоящее время линейные электрические генераторы находят широкое применение в автономных энергетических установках различных типов, в том числе на основе свободнопоршневых ДВС и двигателей Стирлинга [1, 2]. За счет простоты конструкции линейных электрогенераторов и свободнопоршневого ДВС повышается надежность автономного источника электропитания [3]. Существуют различные методики проектирования линейных электрогенераторов с постоянными магнитами [4], однако, при этом отсутствуют рекомендации к выбору геометрии магнитной системы в виде соотношений ее геометрических размеров. На основании численного компьютерного моделирования различных типоразмеров конструктивных исполнений ЛГПМ (с радиально и аксиально намагниченными постоянными магнитами (ПМ), с Хальбах типом магнитной системы, с постоянными магнитами формы параллелепипеда) при выполнении исследований были

¹Работа выполнена при поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований (РФФИ) в рамках договора № 20-38-90124\20 по гранту «Аспиранты».

получены рекомендации в виде соотношений геометрических размеров магнитной системы, которые позволяют получить наиболее близкую к синусоидальной форму выходного напряжения при условии постоянной скорости перемещения ПЭ.

Для иллюстрации предлагаемых элементов методики проектирования выполнено исследование ЛГПМ с разным конструктивным исполнением магнитных систем с помощью программного комплекса ANSYS Electromagnetic Suite.

II. РЕКОМЕНДАЦИИ К ПРОЕКТИРОВАНИЮ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ КОНСТРУКТИВНЫХ ИСПОЛНЕНИЙ ЛГПМ

На рис. 1 приведена трехмерная геометрическая модель и эскиз линейного электрогенератора с постоянными магнитами аксиальной намагниченности.

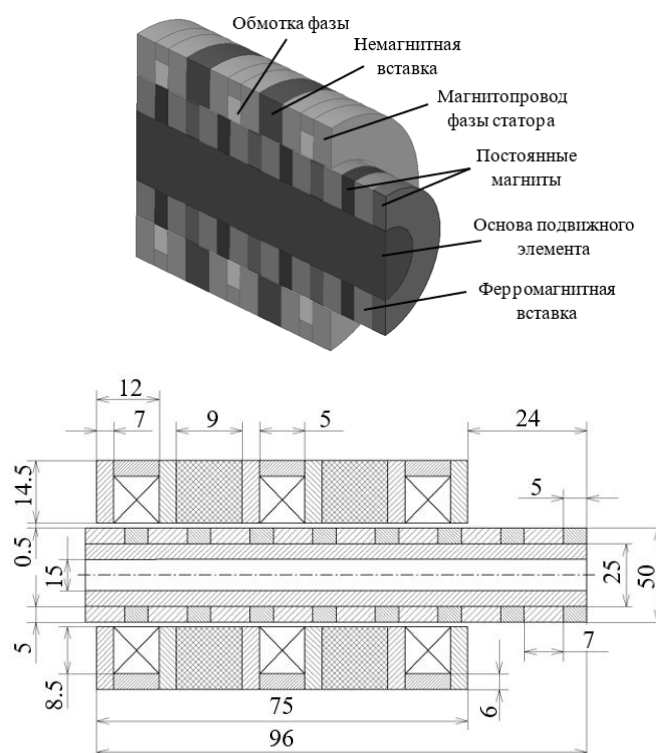
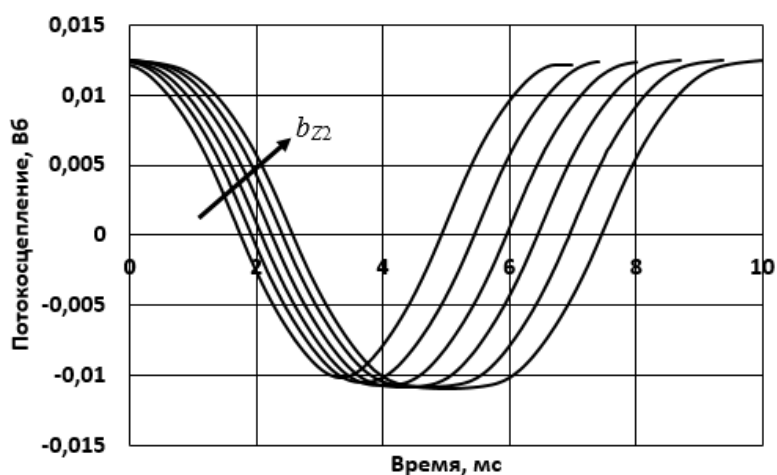


Рис. 1. Трехмерная модель и эскиз линейного электрогенератора с постоянными магнитами аксиальной намагниченности

ЛГПМ с аксиальной системой намагниченности разрабатывался как аналог отечественного трехфазного электрогенератора серии «432.3701», мощностью 76,9 Вт и с номинальным линейным напряжением 18,84 В частотой 50 Гц. Материал постоянных магнитов ЛГПМ NdFeB-N38 [5] с остаточной намагниченностью $B_r = 1.235$ Тл и коэрцитивной силой $H_c = 900$ кА/м. Материал магнитопровода - Сталь 3 [6]. Каждая катушка фазы содержит 16 витков и намотана проводом диаметром 1 мм. При численном компьютерном моделировании средняя постоянная скорость ПЭ была задана 1,2 м/с с учетом обеспечения частоты напряжения 50 Гц конструкцией ЛГПМ [7].

Для оценки влияния соотношения ширины зубца статора bZ и ферромагнитной вставки ПЭ $bZ2$ (на рис. 1 геометрические размеры $bZ = 7$ мм, $bZ2 = 5$ мм) конструкции ЛГПМ аксиальной намагниченности ширина ферромагнитной вставки $bZ2$ изменялась в диапазоне от 5 до 10 мм с шагом 1 мм при постоянной ширине зубца статора равной $bZ = 5$ мм. Таким образом, отношение $bZ / bZ2$ изменялось в пределе от 0.5 до 1 о.е.

Результаты численного компьютерного моделирования, в виде графиков изменения потокосцепления и напряжения холостого хода (ЭДС) одной фазы при постоянной средней скорости перемещения ПЭ $v = 1.2$ м/с с заданными условиями изменения соотношения $bZ / bZ2$, приведены на рис. 2.



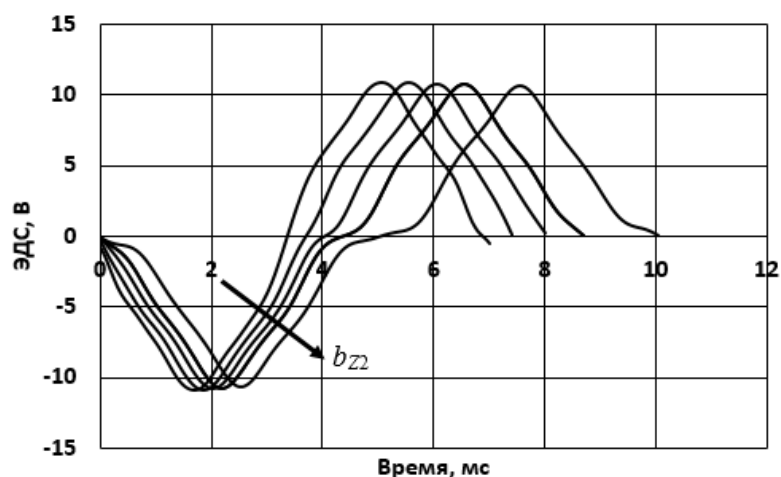


Рис. 2. Изменение формы потокосцепления и ЭДС обмотки одной фазы ЛГПМ аксиального намагничивания при $bZ2 = 5 \dots 10$ мм и $bZ = 5$ мм

Из рис. 2 видно, что при уменьшении отношения $bZ / bZ2$ форма кривой напряжения искажается и становится несинусоидальной. В соответствии с рис. 2 диапазон изменения отношения равный $bZ / bZ2 = 0.625 \dots 0.83$ о.е. соответствует близкой к синусоидальной кривой ЭДС.

При этом, помимо несинусоидальности напряжения холостого хода с изменением соотношения $bZ / bZ2$ изменяется форма его полупериода. Для определения влияния соотношения $bZ / bZ2$ на форму полупериода ЭДС и потокосцепления ширина зубца статора bZ изменялась в диапазоне от 7 до 14 мм с шагом 1 мм при постоянной ширине ферромагнитной вставки ПЭ равной $bZ2 = 14$ мм. Таким образом, отношение $bZ / bZ2$ изменялось в пределе от 0.5 до 1 о.е.

Результаты численного компьютерного моделирования, в виде графиков изменения потокосцепления и напряжения холостого хода (ЭДС) одной фазы при постоянной средней скорости перемещения ПЭ $v = 1.2$ м/с с заданными условиями изменения соотношения $bZ / bZ2$, приведены на рис. 3.

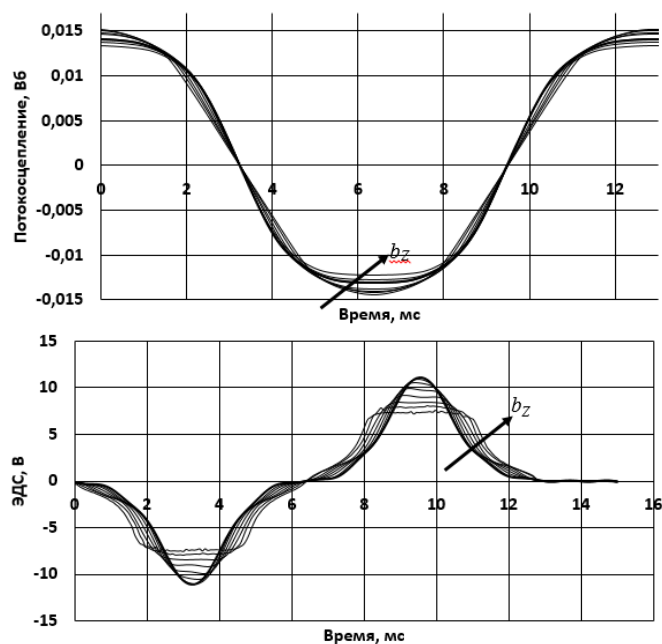


Рис. 3. Изменение формы периода потокосцепления и ЭДС обмотки одной фазы ЛГПМ аксиального намагничивания при $bZ = 7 \dots 14$ мм и $bZ2 = 14$ мм

Из рис. 3 видно, что с увеличением отношения $bZ / bZ2$ форма кривой напряжения стремится к трапецеидальной (при $bZ / bZ2 = 1.0$ о.е.). Согласно рис. 3 диапазон изменения отношения равный $bZ / bZ2 = 0.5 \dots 0.71$ о.е. обеспечивает наиболее близкое к синусоидальной форме напряжение холостого хода.

Таким образом, по результатам анализа рис. 2 и 3, можно установить рекомендуемый диапазон изменения соотношения $bZ / bZ2 = 0.6 \dots 0.7$ о.е.

На рис. 4 приведена трехмерная модель и эскиз линейного электрогенератора с постоянными магнитами радиальной намагниченности.

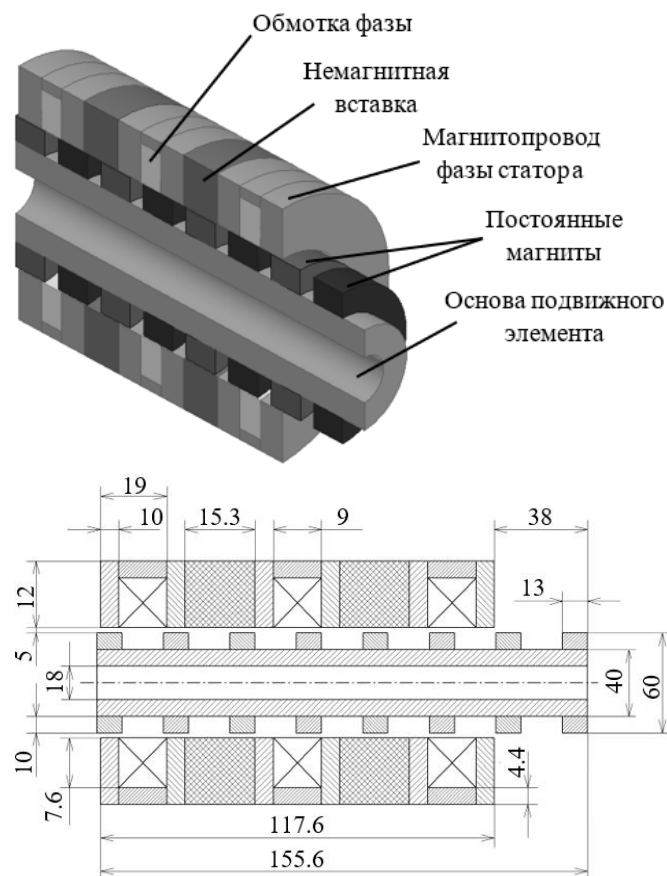


Рис. 4. Трехмерная модель и эскиз линейного электрогенератора с постоянными магнитами радиальной намагниченности

ЛГПМ радиальной намагниченности разрабатывался в соответствии с характеристиками и параметрами трехфазного электрогенератора КЗАТЭК 5102.3771 для автомобилей ВАЗ, мощностью 1 кВт, номинальным линейным напряжением 18,84 В, частотой 50 Гц.

Материалы магнитной системы для численной компьютерной модели аналогичны материалам ЛГПМ с аксиальной намагниченностью: NdFeB-N38 [5] и Сталь 3 [6], фазная катушка также содержит 16 витков.

Для исследования влияния соотношения ширины зубца статора bZ и постоянного магнита $bПМ$ (на рис. 4 геометрические размеры $bZ = 10$ мм, $bПМ = 13$ мм) на параметры ЛГПМ радиальной намагниченности ширина зубца статора bZ изменялась в диапазоне от 5 до 13 мм с шагом 1 мм при постоянной ширине ПМ равной $bПМ = 13$ мм. Таким образом, отношение $bZ / bПМ$ изменялось в диапазоне от 0,38 до 1. Результаты численного моделирования

приведены на рис. 5 в виде графиков изменения потокосцепления и напряжения холостого хода (ЭДС) одной фазы при постоянной средней скорости перемещения ПЭ $v = 1,2$ м/с, соответствующей частоте напряжения 50 Гц.

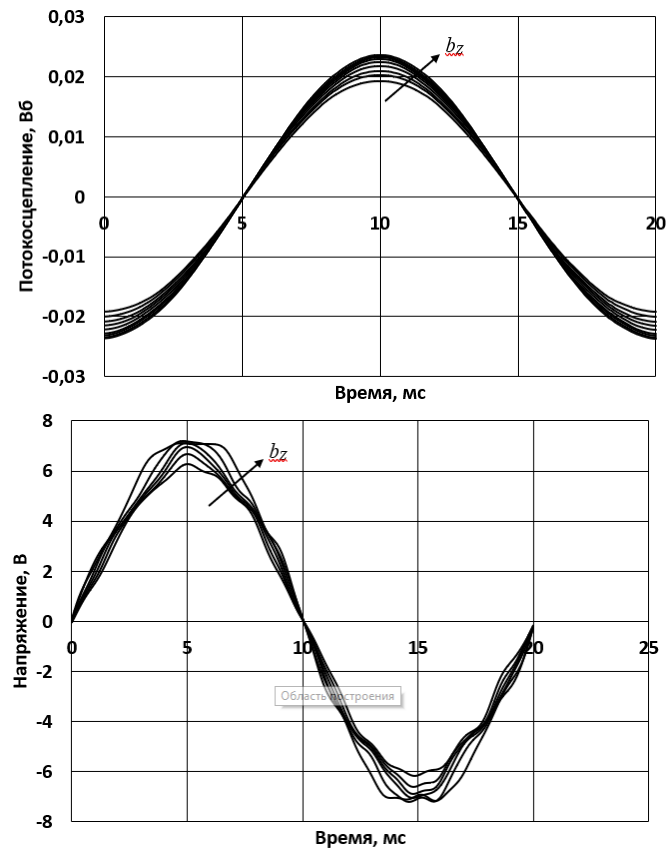


Рис. 5. Изменение формы потокосцепления и ЭДС обмотки одной фазы ЛГПМ аксиального намагничивания при $b_z = 5 \dots 13$ мм и $b_{ПМ} = 13$ мм

Для исследования влияния соотношения ширины постоянного магнита $b_{ПМ}$ и полюсного деления статора τ (на рис. 4 геометрический размер $\tau = 19$ мм) конструкции ЛГПМ радиальной намагниченности полюсное деление статора τ изменялась в диапазоне от 13 до 26 мм с шагом 3 мм при постоянной ширине ПМ $b_{ПМ}$ равной 13 мм. Таким образом, отношение $b_{ПМ} / \tau$ изменялось в пределах от 0,5 до 1.

Результаты численного моделирования в виде графиков изменения потокосцепления и напряжения холостого хода одной фазы при постоянной средней скорости перемещения ПЭ $v = 1,2$ м/с при заданных условиях изменения соотношения $b_{ПМ}/\tau$ приведены на рис. 6.

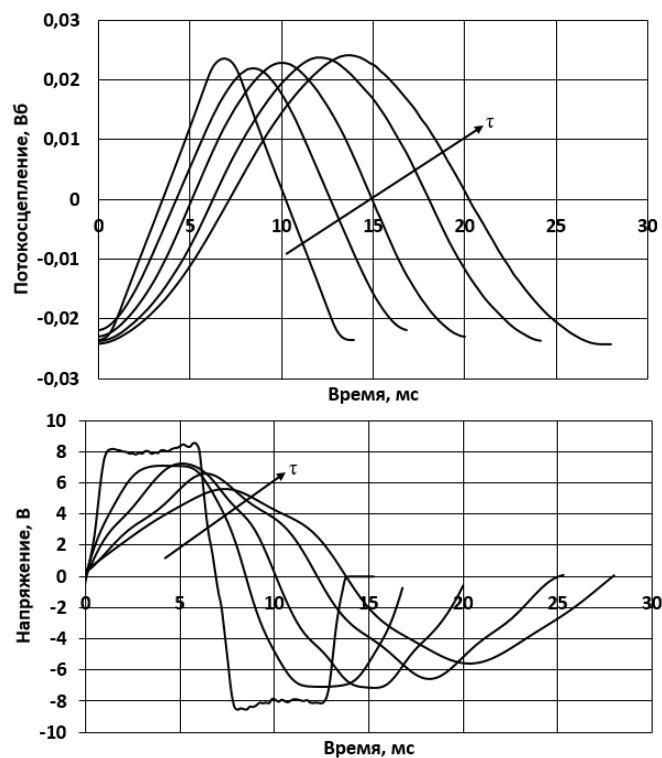


Рис. 6. Изменение формы потокосцепления и напряжения холостого хода обмотки одной фазы ЛГПМ радиальной намагниченности при τ от 13 до 26 мм и $b_{\text{ПМ}}=13$ мм

Согласно рис. 6 рекомендуемое значение отношения $b_{\text{ПМ}}/\tau$ находится в диапазоне от 0.56 до 0.68, что соответствует близкой к синусоидальной форме напряжения.

На рис. 7 приведена трехмерная модель и эскиз линейного электрогенератора с Хальбах магнитной системой (совокупность постоянных магнитов радиальной и аксиальной намагниченности) цилиндрического исполнения.

Линейный электрогенератор с Хальбах магнитной системой разрабатывался в соответствии с договором на выполнение НИОКР №14462ГУ/2019 в рамках предоставления гранта Фондом Содействия Инновациям, мощность 0.5 кВт, номинальное напряжение 220 В частотой 50 Гц. Материал модулей статора – Steel M36-29G; аксиально и радиально намагниченные ПМ – NdFeB-N38 [5]. Количество витков фазной обмотки статора 120, провод диаметром 0,6 мм, каркас катушки – пластик.

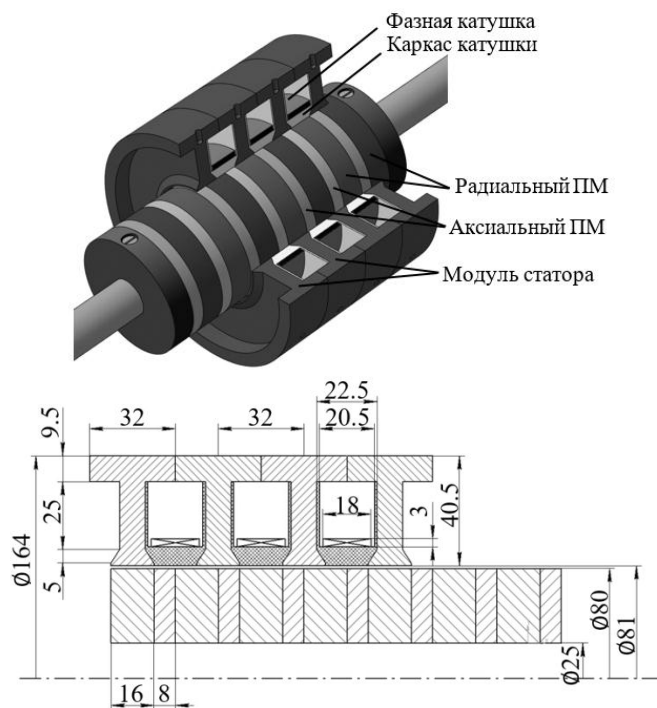
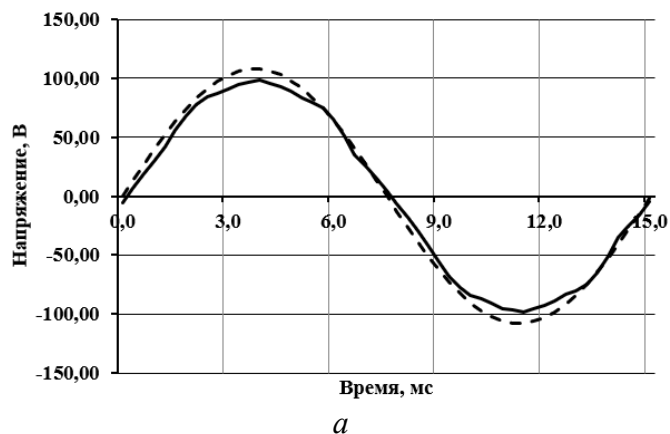


Рис. 7. Трехмерная модель и эскиз линейного электрогенератора с Хальбах магнитной системой подвижного элемента цилиндрического исполнения

По результату численного моделирования ряда конструкций ЛГПМ с Хальбах магнитной системой для соотношения полюсного деления ПЭ и ширины зубца статора $\tau_{\text{ПМ}} / b_z$ (на рис. 7 геометрические размеры $\tau_{\text{ПМ}} = 32$ мм, $b_z = 16$ мм) был определен диапазон 1.4...1.6 о.е, который соответствует выходному напряжению близкому к синусоидальному. На рис. 8 приведена форма выходного напряжения для указанных границ диапазона соотношения $\tau_{\text{ПМ}} / b_z$.



а

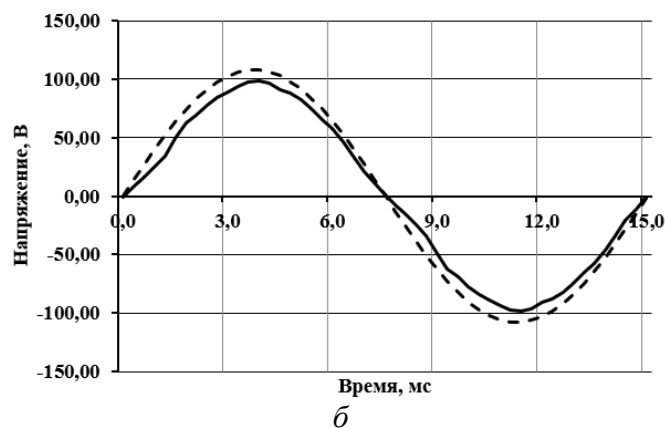
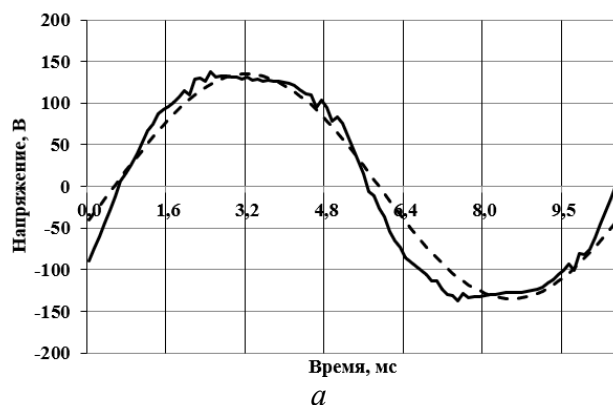


Рис. 8. Выходное напряжение ЛГПМ с Хальбах магнитной системой при соотношениях $\tau_{\text{ПМ}} / bZ = 1.4$ о.е. (а) и $\tau_{\text{ПМ}} / bZ = 1.6$ о.е. (б)

Посредством численного компьютерного моделирования ряда конструкций ЛГПМ с Хальбах магнитной системой для соотношения размеров радиального и аксиального ПМ по сторонам намагниченности $b_{\text{ПМ.Р}} / l_{\text{ПМ.А}}$ (на рис. 7 геометрические размеры $b_{\text{ПМ.Р}} = 16$ мм, $l_{\text{ПМ.А}} = 22.5$ мм) был определен диапазон $0.75 \dots 1.0$ о.е, который позволяет получить близкое к синусоидальной форме выходное напряжение, без учета влияния соотношения $\tau_{\text{ПМ}} / bz$. На рис. 9 приведена форма выходного напряжения для указанных границ диапазона.



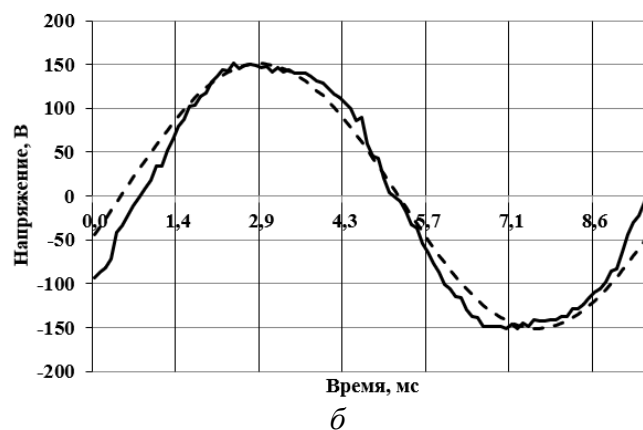
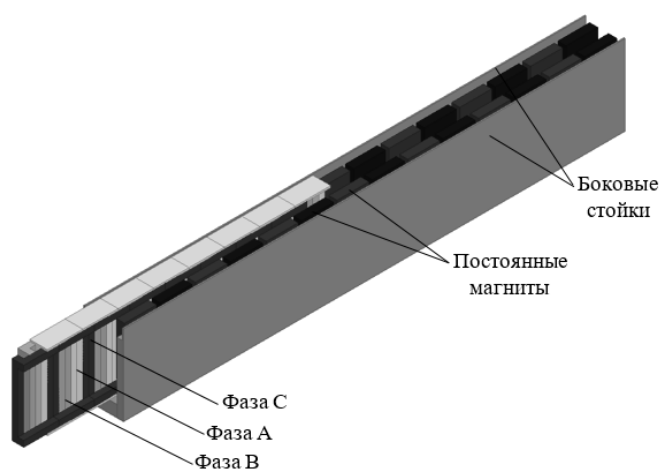


Рис. 9. Выходное напряжение ЛГПМ с Хальбах магнитной системой при соотношении $b_{ПМ.Р}/l_{ПМ.А} = 1.0$ о.е. (а) и $b_{ПМ.Р}/l_{ПМ.А} = 0.75$ о.е. (б)

Предлагаемые элементы методики были использованы при проектировании линейного электрического генератора с постоянными магнитами плоского прямоугольного конструктивного исполнения магнитной системы. При исследовании использовалась магнитная система линейного электродвигателя Bosch Rexroth MCL40 [8]. Исследование проводилось в рамках договора №20-38-90124\20 с Российским Фондом Фундаментальных Исследований по гранту «Аспиранты». На рис. 10 приведена трехмерная модель и эскиз линейного электрогенератора плоского прямоугольного конструктивного исполнения.



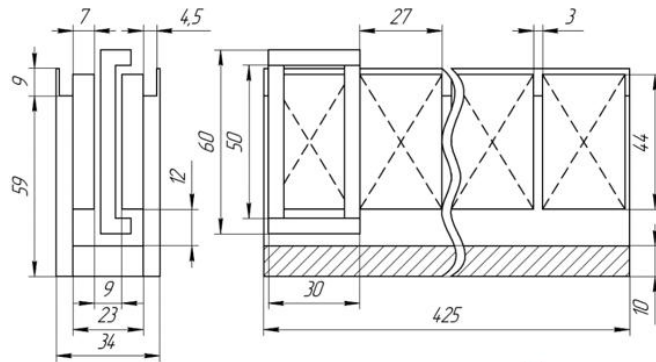


Рис. 10. Трехмерная модель и эскиз линейного электрогенератора с постоянными магнитами плоского прямоугольного конструктивного исполнения

Материал ПМ – SmCo28 [5], материал магнитопровода – Steel 1010 [9], материал катушки – медь, катушка содержит 100 витков.

На рис. 11 приведен график влияния на форму индукции в рабочем воздушном зазоре $B\delta$ изменения соотношения между полюсным делением τ и шириной ПМ $b_{\text{ПМ}}$ (на рис. 10 геометрические размеры $\tau = 60$ мм, $b_{\text{ПМ}} = 27$ мм).

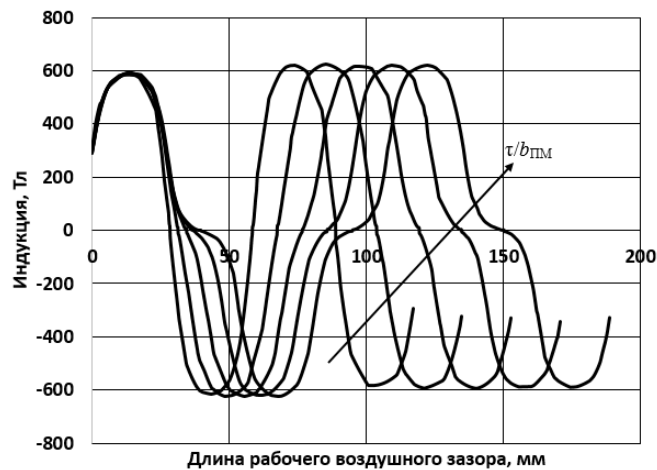


Рис. 11. Изменение формы индукции в рабочем воздушном зазоре $B\delta$ в зависимости от изменения соотношения $b_{\text{ПМ}}/\tau = [0,9 \dots 0,5]$ о.е.

Исследование проводилось при варьировании полюсного деления τ путем изменения расстояния между последовательно установленными ПМ $\delta_{\text{ПМ}} = [3 \dots 27]$ мм (на рис. 10 геометрический размер $\delta_{\text{ПМ}} = 3$ мм) с шагом 6 мм, так как $\tau = b_{\text{ПМ}} + \delta_{\text{ПМ}}$, при постоянном значении ширины ПМ $b_{\text{ПМ}} = \text{const}$.

Из рис. 11 видно, что наиболее близким к синусоидальному распределению индукции в рабочем воздушном зазоре $B\delta$ соответствует соотношение $b_{ПМ}/\tau = [0,9...0,75]$ о.е. На форму выходного напряжения ЛГПМ также влияет соотношение между полюсным делением τ и шириной фазной катушки b_k (на рис. 9 геометрический размер $b_k = 30$ мм). На рис. 12 приведены результаты исследования, путем численного компьютерного моделирования, влияния соотношения τ/b_k на форму ЭДС линейного электрогенератора.

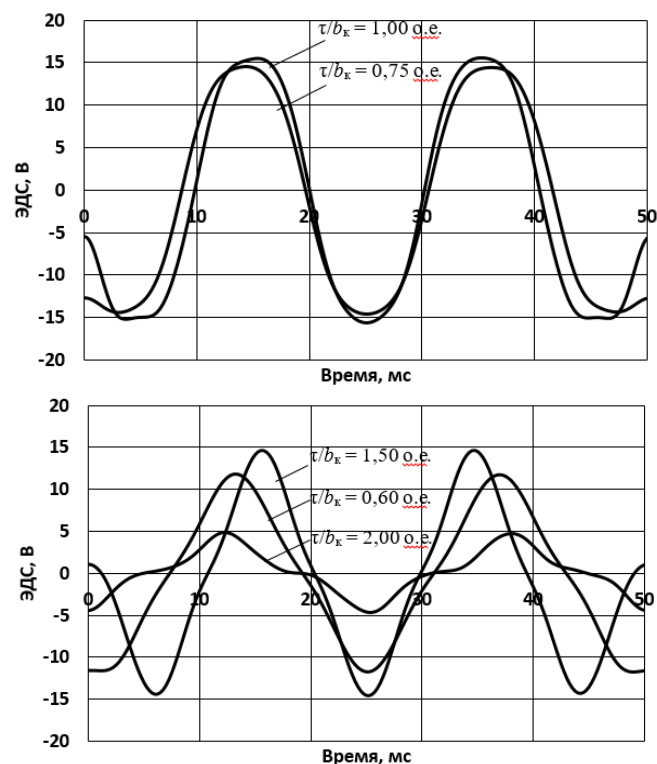


Рис. 12. Влияние соотношения τ/b_k на форму ЭДС ЛГПМ

В соответствии с рис. 11 и 12 можно сделать вывод, что значение для соотношения полюсного деления τ и ширины фазной катушки b_k равное $\tau/b_k = 1$ о.е. соответствует близкой к синусоидальной форме кривой напряжения холостого хода (ЭДС).

III. ЭЛЕМЕНТЫ МЕТОДИКИ ПРОЕКТИРОВАНИЯ ЛГПМ

Методика проектирования линейных электрогенераторов с постоянными магнитами аксиальной и радиальной намагниченности описана в [10], методику

проектирования ЛГПМ с Хальбах магнитной системой также можно получить путем преобразования методики проектирования [10].

Методика расчета постоянных магнитов для различных конструктивных исполнений ЛГПМ приведена в [11].

Основу методики проектирования ЛГПМ составляет взаимосвязь между параметрами процесса гармонического возвратно-поступательного перемещения ПЭ и ЭДС в фазных обмотках в динамическом режиме преобразования энергии.

ПЭ линейного электрогенератора совершает возвратно-поступательные движения, в крайних положениях его скорость равна нулю и максимальна в середине рабочего хода (РХ). Индукция магнитного поля в рабочем зазоре меняется между двумя разноименно намагниченными парами полюсов (ПМ).

Гармонический закон изменения скорости ПЭ $v_{ПЭ}(t)$, средняя $v_{ПЭ.ср}$ и максимальная скорость $v_{ПЭ.мах}$ на одном рабочем ходе ЛГПМ, определяются уравнением (рис. 13):

$$\begin{aligned}
 v_{ПЭ}(t) &= v_{ПЭ.мах} \sin(\omega_x t); \\
 v_{ПЭ.ср} &= \frac{2}{T_x} \int_0^{T_x/2} v_{ПЭ.мах} \sin(\omega_x t) dt = \\
 &= \frac{2}{\pi} v_{ПЭ.мах}.
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

С учетом уравнения (1), закон изменения координаты перемещения ПЭ $x_{ПЭ}(t)$ можно записать в виде (рис. 13):

$$\begin{aligned}
 x_{ПЭ}(t) &= \int v_{ПЭ.мах} \sin(\omega_x t) dt = \\
 &= -\frac{v_{ПЭ.мах}}{\omega_x} \cos(\omega_x t).
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

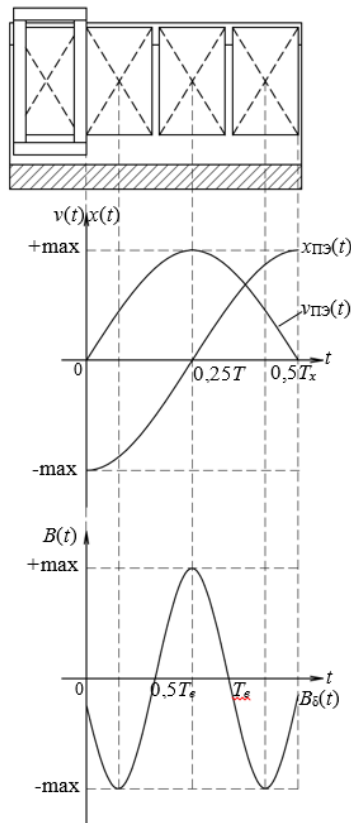


Рис. 13. Изменение скорости и координаты перемещения ПЭ, индукции в рабочем зазоре, приходящегося на один РХ

Согласно графикам изменения скорости $v_{ПЭ}(t)$ и координаты перемещения $x_{ПЭ}(t)$, изображенным на рис. 13, максимальное значение координаты перемещения $x_{ПЭ.max}$ равно половине РХ ПЭ LPX : $x_{ПЭ.max} = 0,5LPX$.

Индукция в рабочем воздушном зазоре $B_{\delta}(t)$ также носит гармонический характер, с изменением координаты перемещения $x_{ПЭ}(t)$ от одной пары полюсов к другой, закон изменения индукции можно записать уравнением (рис. 13):

$$B_{\delta}(t) = -B_{\delta.max} \sin(\omega_e t).$$

3)

Частота f_x изменения координаты перемещения $x_{ПЭ}(t)$ и скорости $v_{ПЭ}(t)$ ПЭ связана соотношением с частотой f_e индукции в рабочем воздушном зазоре $B_{\delta}(t)$, которая совпадает с частотой, наведенной в обмотке ЭДС (рис. 13):

$$f_e = \frac{L_{PX}}{\tau} f_x. \quad 4)$$

С учетом (1), (2), (3), (4) выражение, определяющее взаимосвязь между механическими параметрами перемещения ПЭ и наведенной ЭДС фазной катушки, можно записать как:

$$E_K(t) = 2 \cdot B_{\delta, \max} \sin\left(2\pi \frac{L_{PX}}{\tau} f_x \cdot t\right) \cdot \\ \cdot L_{PX} \pi f_x \sin(2\pi f_x \cdot t) \cdot l_i \cdot w, \quad 5)$$

где $f_e = \frac{L_{PX}}{\tau} f_x$ – частота индукции в рабочем воздушном зазоре и наведенной ЭДС фазной катушки; $v_{ПЭ, \max} = L_{PX} \pi f_x = x_{ПЭ, \max} \omega_x$ – максимальное значение скорости перемещения ПЭ.

Таким образом, уравнение (5) позволяет аналитически рассчитать ЭДС линейного электрогенератора и математически связывает геометрические размеры ЛГПМ, его механические параметры перемещения ПЭ и выходные параметры напряжения.

Адекватность полученной математической модели была подтверждена с помощью численного компьютерного моделирования.

Рабочий ход ЛГПМ, с учетом эскиза на рис. 10, составляет $L_{PX} = 90$ мм. Пусть один РХ линейный электрогенератор совершает за 1 с, тогда частота его механического перемещения равна $f_x = 0,5$ Гц. С учетом того, что полюсное деление ЛГПМ равно $\tau = 30$ мм, частота индукции в зазоре и ЭДС будет равна $f_x = 3f_e = 1,5$ Гц в соответствии с (4).

Таким образом, закон изменения скорости (1) при численном компьютерном моделировании будет задан как: $v_{ПЭ}(t) = 0,1366$ м/с $\cdot \sin(3,1416 \text{ с}^{-1} \cdot t)$.

ЭДС катушки (5), с учетом закона изменения скорости, при активной длине одного проводника (длина проводника, целиком расположенная под ПМ) $l_i = 44$ мм и числе витков катушки $w = 100$ (рис. 10), аналитически будет определяться как: $E_K(t) = 2 \cdot 0,62$ Тл $\cdot \sin(3 \cdot 3,1416 \text{ с}^{-1} \cdot t) \cdot 0,1366 \frac{\text{м}}{\text{с}} \cdot \sin(3,1416 \text{ с}^{-1} \cdot t) \cdot 0,044 \text{ м} \cdot 100$.

Максимальное значение индукции $B\delta = 0,62$ Тл определено по методике, изложенной в [11].

На рис. 14 приведено сравнение графиков индукции магнитного поля в рабочем воздушном зазоре, полученных на основе численного компьютерного моделирования и аналитически с учетом (3).

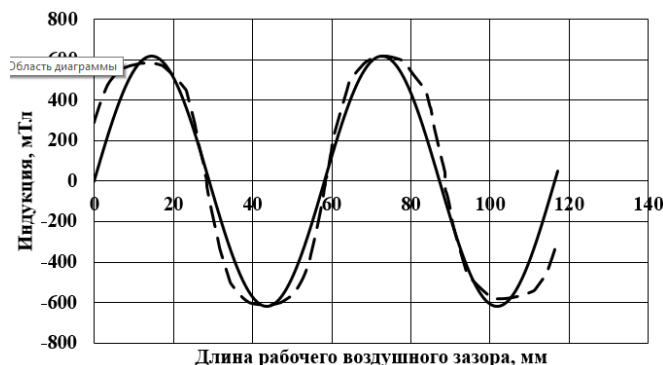


Рис. 14. Индукция в рабочем воздушном зазоре по результату численного компьютерного моделирования (штриховая линия) и аналитического расчета (сплошная линия)

На рис. 15 приведено сравнение графиков ЭДС фазной катушки по результату численного компьютерного моделирования и аналитического расчета с учетом формулы (5).

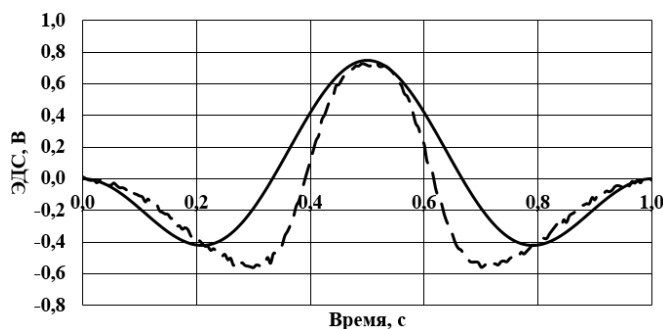


Рис. 15. ЭДС фазной катушки по результату численного компьютерного моделирования (штриховая линия) и аналитического расчета (сплошная линия)

В соответствии с рис. 15, формулы (1-5) позволяют прогнозировать, с некоторым расхождением по форме при одновременном совпадении по фазе и амплитуде, наводимую ЭДС в катушке, при работе ЛГПМ в динамическом

режиме, что подтверждает адекватность предложенной методики проектирования, которая подробно изложена в [10]. Формулы (1-5) являются справедливыми для всех рассмотренных в настоящей статье конструктивных исполнений ЛГПМ.

На рис. 16 приведена трехфазная ЭДС, график которой получен путем численного компьютерного моделирования ЛГПМ плоского прямоугольного конструктивного исполнения (рис. 10).

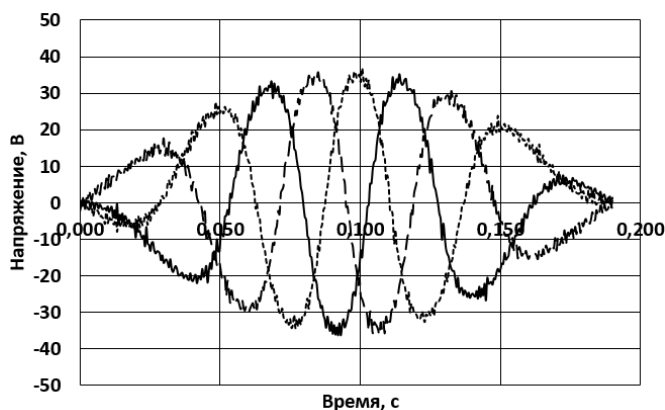


Рис. 16. Трехфазное напряжение холостого хода ЛГПМ плоского прямоугольного конструктивного исполнения

С учетом (1), (3), (5) трехфазное напряжение рассмотренных конструктивных исполнений ЛГПМ, будет иметь аналогичный вид, представленному на рис. 16.

IV. ВАЛИДАЦИЯ ЧИСЛЕННЫХ КОМПЬЮТЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Валидация, используемых численных компьютерных моделей, проводилась посредством экспериментальных исследований существующих прототипов ЛГПМ плоского прямоугольного конструктивного исполнения, аксиального намагничивания и ЛГПМ с Хальбах магнитной системой.

Вид лабораторного стенда для проведения экспериментальных исследований перечисленных конструктивных исполнений ЛГПМ приведен на рис. 17.

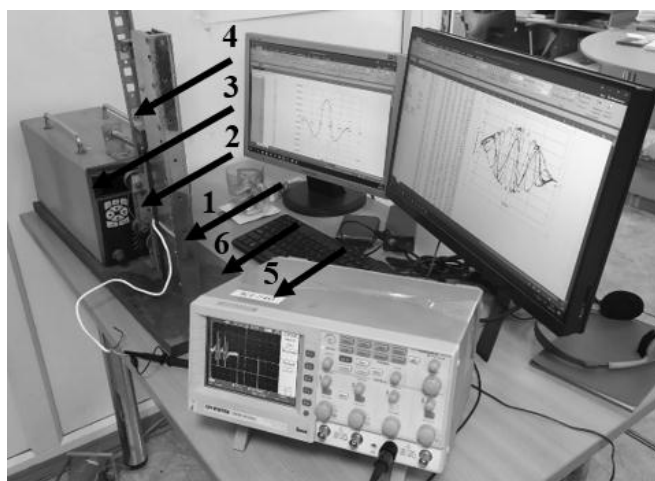


Рис. 17. Стенд для проведения экспериментального исследования ЛГПМ и вспомогательное оборудование контроля параметров:
 1 – ЛГПМ; 2 – механическое сцепное устройство; 3 – движитель; 4 – направляющая;
 5 – осциллограф; 6 – массивная платформа

На рис. 18 приведены оцифрованные осциллограммы с экрана осциллографа и результаты численного компьютерного моделирования ЛГПМ плоского прямоугольного конструктивного исполнения магнитной системы.

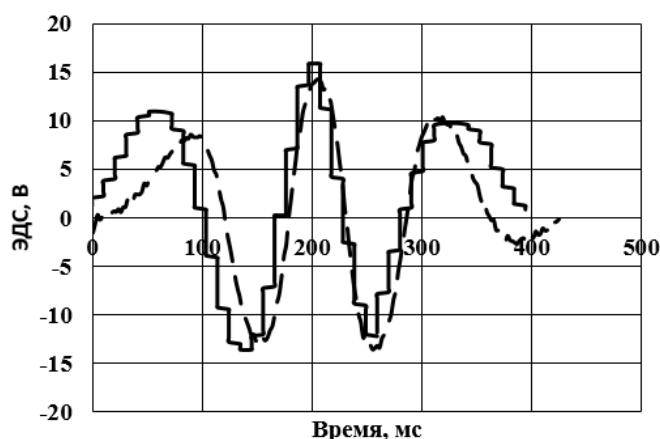


Рис. 18. Оцифровка осциллограммы (сплошная линия) в сравнении с результатом численного компьютерного моделирования (пунктирная линия)

Анализ графиков на рис. 18 показывает, что половина периода механического перемещения ПЭ (рис. 9, 12) равна $0,5T_x = 425$ мс, что соответствует закону изменения скорости $v(t) = 0,5803\text{м/с} \cdot \sin(7,3920\text{с}^{-1} \cdot t)$. Сравнение результатов экспериментального исследования с данными численного компьютерного моделирования, показывает, что максимальная

амплитуда ЭДС (напряжения холостого хода), полученного экспериментально, составляет 15,4 В, для результата численного компьютерного моделирования максимальная амплитуда ЭДС составляет 14,2 В. Таким образом, расхождение результатов экспериментального исследования и численного компьютерного моделирования не превышает 7,8 %. Средняя частота ЭДС (напряжения холостого хода), полученного экспериментально составляет 9,5 Гц, для результата численного компьютерного моделирования 9,2 Гц, то есть расхождение составляет величину не более 3,3%.

Сравнение результатов экспериментального исследования и численного компьютерного моделирования проведенных для ЛГПМ аксиальной намагниченности и с Хальбах типом магнитной системы показали, что расхождение по фазному напряжению составляет 12% и 4% соответственно.

Таким образом, адекватность и достоверность численных компьютерных моделей, используемых при исследовании различных конструктивных исполнений ЛГПМ подтверждена процессом валидации с использованием полученных экспериментальных данных.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Посредством численных компьютерных моделей различных конструктивных исполнений ЛГПМ, адекватность которых подтверждена экспериментально, были получены рекомендации к проектированию в виде диапазонов соотношений геометрических размеров магнитной системы, которые обеспечивают близкую к синусоидальной форму выходного напряжения.

Соотношение между шириной зубца статора bZ и ферромагнитной вставкой ПЭ для ЛГПМ аксиальной намагниченности (рис. 1) рекомендуется выбирать из диапазона $bZ / bZ2 = 0.6 \dots 0.7$ о.е.

Соотношение между шириной ПМ $b_{ПМ}$ и полюсным делением τ для ЛГПМ радиальной намагниченности (рис. 4) целесообразно выбирать из диапазона $b_{ПМ} / \tau = 0.56 \dots 0.68$ о.е.

Соотношение между полюсным делением ПЭ $\tau_{\text{ПМ}}$ и ширины зубца статора b_z для ЛГПМ с Хальбах типом магнитной системы (рис. 7) могут быть выбраны из диапазона $\tau_{\text{ПМ}} / b_z = 0.56 \dots 0.68$ о.е. При этом, следует учитывать, что для соотношения размеров ПМ по стороне намагниченности для аксиального ЛПМ.А и радиального бПМ.Р намагничивания, рекомендуется выбирать из диапазона $b_{\text{ПМ.Р}} / l_{\text{ПМ.А}} = 0.75 \dots 1.0$ о.е.

Соотношения между геометрическими размерами магнитной системы ЛГПМ плоского прямоугольного конструктивного исполнения (рис. 10) рекомендуется выбирать из диапазонов: $b_{\text{ПМ}}/\tau = [0,9 \dots 0,75]$ о.е для ширины ПМ и полюсного деления; $\tau/b_k = 1$ о.е. для полюсного деления и ширины фазной катушки.

Приведенные элементы методики проектирования ЛГПМ, адекватность которой подтверждена с помощью численного компьютерного моделирования и экспериментальных данных, позволяют производить расчет динамических режимов работы, описывают взаимосвязь основных параметров геометрии магнитных систем, механического перемещения и выходного напряжения и могут служить основой методик проектирования конструкций отличных от рассматриваемых в настоящей статье.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Линейные электрические машины возвратно-поступательного действия — области применения / В.Б. Баль, В.Я. Геча, В.И. Гончаров, Е.В. Ежов, В.Г. Чиркин, С.В. Ширинский, Л.Ю. Лежнев // Вопросы электромеханики. Труды ВНИИЭМ. 2015. Т. 149, №6. С. 3-17.
2. Шустров Ф.А., Иванов Д.А., Некрасов А.С. Техничко-экономическая оценка использования свободнопоршневых двигателей с внешним подводом теплоты в составе установок малой распределенной энергетики // Международный журнал прикладных и фундаментальных исследований. 2017. № 11-1. С. 22-27.
3. И.А. Царьков, С.В. Фунин, А.В. Выжлов. В России создан инновационный источник питания Эвонгресс, предназначенный для замены ПЭ ORMAT и прочих низкоэффективных автономных источников энергообеспечения / Научно-технический и производственный журнал «Газовая промышленность». Спецвыпуск №1 (814). 2021 г. С. 112-117.
4. Обзор технических решений и методов проектирования линейных электрических генераторов с постоянными магнитами / А.С. Крамаров, А.В. Павленко, Д.В. Батищев, И.В. Троценко // Изв. вузов. Электромеханика. 2021. Т. 64. № 6. С. 36-51. DOI:10.17213/0136-3360-2021-6-36-51.
5. China Standard: GB/T 13560-2017 (ТУ 25.99.29-003-95228214-2020).

6. В.В. Суханов. Электромагнитный привод для очистки фильтра сушильного барабана. Санкт-Петербургский Государственный Политехнический Университет, кафедра «Электрические машины». С. 139-166.
7. Крамаров А.С., Батищев Д.В., Большенко И.А., Гониволк А.Ю. Методика проектирования линейного электрогенератора с постоянными магнитами радиальной намагниченности // Изв. вузов. Электромеханика. 2020. Т. 63, № 4. С. 13-21. DOI: 10.17213/0136-3360-2020-4-13-21. Available: <http://home.process.com/Intranets/wp2.htm>
8. Rexroth. A Bosch company. Synchronous Linear Motors MCL040. URL: <https://www.boschrexroth.com/ru/xc/products/product-groups/electric-drives-and-controls/motors-and-gearboxes/synchronous-linear-motors/mcl/mcl040> (дата обращения 16.10.2022).
9. Ivan C. Carmona, Deepak Kumbhare, Mark S. Baron, and Ravi L. Hadimani. Quintuple AISI 1010 carbon steel core coil for highly focused transcranial magnetic stimulation in small animals. AIP Advances. Volume 11, Issue 2. Published Online: 01 February 2021. <https://doi.org/10.1063/9.0000219>.
10. Крамаров А.С., Батищев Д.В., Большенко И.А., Гониволк А.Ю. Методика проектирования линейного электрогенератора с постоянными магнитами радиальной намагниченности // Изв. вузов. Электромеханика. 2020. Т. 63, № 4. С. 13-21. DOI:10.17213/0136-3360-2020-4-13-21
11. Крамаров А.С., Нгуен Фьонг Ти. Методика расчета магнитной цепи и выбора постоянных магнитов для линейных вентильных электрогенераторов // Изв. вузов. Электромеханика. 2018. Т. 61, № 3. С. 20-25. DOI:10.17213/0136-3360-2018-3-20-25.

Курнос Д. А., Воронин С. Г., Кулёва Н. Ю.
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»

ФАЗОВОЕ УПРАВЛЕНИЕ ВЕНТИЛЬНЫМ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ¹

Аннотация: Фазовое управление вентильным электроприводом при наличии датчика углового положения ротора реализуется простейшими средствами. При фазовом управлении регулируется амплитуда и фаза напряжения питания двигателя. При этом отпадает необходимость в координатных преобразователях и измерении фазных токов. В бездатчиковом варианте системы фазового управления фазные токи используются лишь для оценивания электромагнитного момента, частоты вращения и углового положения ротора, необходимые для организации векторного управления приводом. Сепаратные каналы регулирования токов отсутствуют и в этом случае. В рамках фазового управления вентильным электроприводом актуальные задачи расширения диапазона регулирования по частоте вращения и моменту, энергоэффективности управления, снижения затрат на реализацию решаются путем непосредственного согласованного регулирования амплитуды и фазы напряжения питания двигателя на основе оптимальных регулировочных соотношений. Регулируемые координаты изменяются как в функции сигналов управления электроприводом, так и в функции частоты вращения ротора, обеспечивая заданные статические механические характеристики, динамические свойства и энергетические показатели привода. В предлагаемой статье анализируются механические и энергетические характеристики вентильного электропривода, его регулировочные свойства, решаются оптимизационные задачи по повышению эффективности управления приводом, расширению диапазона регулирования по скорости и моменту. Приведены аналитические соотношения,

¹«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-29-20124, <https://rscf.ru/project/22-29-20124/>».

механические и регулировочные характеристики вентильного электропривода при настройке на максимум электромагнитного момента и КПД.

Ключевые слова: синхронный электродвигатель с возбуждением от постоянных магнитов, вентильный электропривод, фазовое управление, оптимальные регулировочные соотношения, электромагнитный момент, энергетическая эффективность, эффективность управления.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для тягового электропривода актуальна задача расширения диапазона регулирования по частоте вращения и моменту: от практически нулевых частот вращения и максимальных моментов до частот вращения существенно больше частоты холостого хода при обеспечении необходимой мощности. Для практически всех электроприводов важна энергоэффективность управления, важны простые и наглядные регулировочные соотношения, обеспечивающие настройку системы управления в соответствии с принятым функционалом качества [1] - [3]. Для перспективных бездатчиковых вентильных электроприводов первостепенное значение имеют простые и эффективные процедуры оценивания переменных и параметров ВД, необходимые для организации векторного управления, работоспособные во всех рабочих режимах, в том числе при малых частотах вращения ВД [4],[5].

Все перечисленные задачи эффективно решаются при использовании в вентильном электроприводе на основе синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов (вентильного двигателя – ВД) фазового управления. Причем, в отличие от широко распространенного метода векторного управления путем автономного регулирования токов по осям d и q , требующих привлечения значительных вычислительных ресурсов [6]-[8], управление предлагается осуществлять путем регулирования амплитуды напряжения и угла коммутации (или фазы напряжения), которое при наличии датчика углового положения ротора реализуется простейшими средствами [9], [10].

На рис. 1 приведены функциональные схемы фазового управления в датчиковом и бездатчиковом исполнении, где обозначено: СДПМ – синхронный двигатель с постоянными магнитами, ШИМ – широтно-импульсный пре-образователь, АИН – автономный инвертор напряжения, ДПР

– датчик положения ротора, УУ – управляющее устройство, РУК – регулятор угла коммутации, ПИ-, ПИД- регуляторы, НС – наблюдатель состояния, НМэ – наблюдатель электромагнитного момента, М – настраиваемая модель ВД.

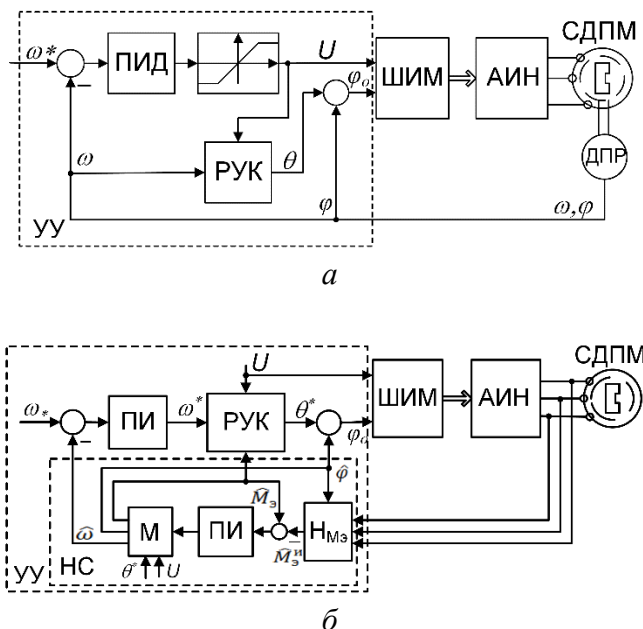


Рис. 1. Функциональные схемы фазового управления ВД с датчиком положения ротора (а) и бездатчиковая (б)

Принципиальной особенностью фазового управления ВД [11] по сравнению с традиционной системой частотно-токового векторного управления является отсутствие координатных преобразователей Парка и Кларк, непосредственная обратная связь по угловому положению ротора и наличие регулятора угла коммутации ВД [12]-[15]. В бездатчиковом варианте привода система фазового управления замыкается по фазным токам, а необходимые для организации векторного управления координаты оцениваются с помощью наблюдателя состояния вентильного электропривода. Наблюдатель состояния состоит из ПИ-регулятора, наблюдателя электромагнитного момента и настраиваемой модели ВД и имеет два контура обратных связей – по оценке электромагнитного момента и оценке углового положения ротора. Наличие регулятора угла коммутации позволяет реализовать различные стратегии управления вентильным электроприводом: обеспечение максимальной частоты

вращения, максимального электромагнитного момента, энергоэффективное управления приводом, управление ослаблением поля и т.д.

Целью данной работы является исследование механических, регулировочных и энергетических характеристик ВД и получение оптимальных регулировочных соотношений, являющихся основой для фазового управления вентильным электроприводом [16]-[18].

II. ОПИСАНИЕ ИССЛЕДОВАНИЯ

A. Описание Объекта исследования

Математическая модель ВД с явно выраженными полюсами (явнополюсного ВД) в роторной системе координат при общепринятых допущениях описывается следующими уравнениями [19], [20]:

$$\begin{aligned}
 u_d &= R i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - L_q p \omega_r i_q, \\
 u_q &= R i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + L_d p \omega_r i_d + p \omega_r \psi_m, \\
 u_d &= -U \sin \theta, u_q = U \cos \theta, \\
 M_\varepsilon &= \frac{3}{2} p i_q \left[\psi_m + i_d (L_d - L_q) \right], \\
 J \frac{d\omega_r}{dt} &= M_\varepsilon - M_n, \frac{\varphi_r}{dt} = \omega_r
 \end{aligned} \tag{1}$$

где i_d, i_q, u_d, u_q - проекции векторов тока и напряжения на оси вращающейся системы координат; L_d, L_q - полные индуктивности обмоток статора по продольной и поперечным осям; R - активное сопротивление фазных обмоток; ψ_m - потокосцепление статора с магнитным потоком ротора; U - амплитуда напряжения; θ - угол коммутации ВД; M_ε, M_n - электромагнитный момент и момент нагрузки; p - число пар полюсов; ω_r, φ_r - угловая скорость и угловое положение ротора; J - приведенный момент инерции ротора и нагрузки.

Отличительной особенностью явнополюсного ВД от неявнополюсного является принципиальная магнитная несимметрия – разная магнитная проводимость машины по продольной и поперечной осям. Вследствие этого во

вращающем моменте ВД появляется реактивная составляющая, обусловленная этой несимметрией. Эта особенность явнополюсного ВД, с одной стороны, позволяет расширить диапазон регулирования двигателя по скорости и моменту, с другой, существенно усложняет его управление.

Приведем описание ВД в относительных единицах. Для этого введем следующую систему базовых величин:

$$U_b = U_m, I_b = \frac{U_b}{R}, \omega = \frac{U_b}{\psi_m}, M_b = \frac{3}{2} p \psi_m I_b, P_b = \frac{3}{2} U_b I_b = M_b \omega_b / p,$$

где $U_b, I_b, \omega, M_b, P_b$ - базовые величины, соответственно, напряжения, тока, частоты вращения, момента и мощности.

Если использовать приведенную систему базовых величин, то уравнения ВД переписутся следующим образом:

$$-\gamma \sin \theta = i_d + \tau_d \frac{di_d}{d\tau} - \tau_q \varepsilon i_q \quad (1a)$$

$$\gamma \cos \theta = i_q + \tau_q \frac{di_q}{d\tau} + \tau_d \varepsilon i_d + \varepsilon \quad (1b)$$

$$\tau_m \frac{d\varepsilon}{d\tau} = p(\mu - \mu_n), \quad \frac{d\varphi}{d\tau} = \varepsilon \quad (1c)$$

$$\mu = i_q + (\tau_d - \tau_q) i_d i_q \quad (1d)$$

где $\gamma, i, \varepsilon, \mu, \tau$ - относительные переменные, соответственно, напряжения, тока, частоты вращения, момента и времени, т.е.

$$\gamma = \frac{U}{U_b}, i = \frac{i}{I_b}, \varepsilon = \frac{\omega}{\omega_b}, \mu = \frac{M}{M_b}, \tau = \omega_b t, \tau_d = \frac{\omega_b L_d}{R},$$

$$\tau_q = \frac{\omega_b L_q}{R}, \tau_m = \frac{J \omega_b^2}{M_b}$$

Проведем исследование математической модели ВД в относительных единицах. Рассмотрим установившийся режим работы.

$$i_q = \frac{\gamma(\varepsilon\tau_d \sin \theta - \cos \theta) - \varepsilon^2\tau_q}{1 + \tau_d\tau_q\varepsilon^2}, \quad (2)$$

$$i_q = \frac{\gamma(\varepsilon\tau_d \sin \theta + \cos \theta) - \varepsilon}{1 + \tau_d\tau_q\varepsilon^2}, \quad (3)$$

$$\mu = \frac{[\gamma(\varepsilon\tau_d \sin \theta + \cos \theta) - \varepsilon][\gamma(\tau_d - \tau_q)]}{[1 + \tau_d\tau_q\varepsilon^2]^2} \cdot \frac{(\varepsilon\tau_q \cos \theta - \sin \theta) + \varepsilon^2\tau_q^2 + 1}{1} \quad (4)$$

На рис. 2 приведены кривые угловой моментной характеристики $\mu(\theta)$ для разных частот вращения ВД. Параметры ВД приведены в таблице 1.

Таблица 1

Параметры ВД

Um, В	R, Ом	Ld, мГн	Lq, мГн	Ψm, Вб	p
24	1	30	20	0,2	5

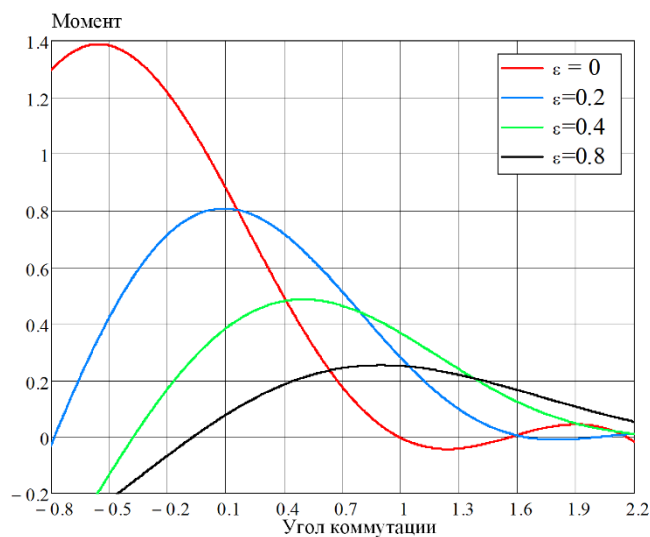


Рис. 2. Угловая моментная характеристика ВД

Анализ кривых говорит о существенной зависимости моментной характеристики ВД от параметров двигателя и величины управляющих координат, в качестве которых выступают амплитуда напряжения статорной обмотки – $U(\gamma)$ и угол коммутации – θ (или фаза напряжения питания).

По-видимому, получение желаемых механических характеристик, в частности расширение диапазона регулирования по скорости и моменту ВД, может быть реализовано за счет изменения именно этих координат.

В. Обеспечение максимального электромагнитного момента двигателя

Поставим задачу обеспечения максимально возможного электромагнитного момента ВД. Такая задача актуальна для тягового электропривода, для которого необходимо поддерживать максимальный момент привода в широком диапазоне изменения частоты вращения привода.

Стандартный подход – дифференцирование зависимости $\mu(\theta)$ по углу θ и приравнивание производной нулю – приводит к следующему уравнению:

$$\sin \theta(2\varepsilon^2\tau_q^2 - \varepsilon^2\tau_d\tau_q + 1) - \cos \theta(\varepsilon^3\tau_d\tau_q^2 + 2\varepsilon\tau_d - \varepsilon\tau_q) + (\tau_d - \tau_q)[\cos 2\theta(\varepsilon^2\tau_d\tau_q - 1)\gamma - \sin 2\theta(\tau_d + \tau_q)\gamma\varepsilon] = 0 \quad (5)$$

которое не решается в аналитических функциях.

Аппроксимируем это уравнение более простым уравнением третьей степени

$$a\theta^3 + b\theta^2 + c\theta + d = 0 \quad (6)$$

$$\begin{aligned} a(\gamma, \varepsilon) &= \frac{4}{3}\gamma\varepsilon(\tau_q^2 - \tau_d^2) - \frac{1}{6}(2\varepsilon^2\tau_q^2 - \varepsilon^2\tau_d\tau_q + 1), \\ b(\gamma, \varepsilon) &= \frac{1}{2}\varepsilon(\varepsilon^2\tau_d\tau_q^2 + 2\tau_d - \tau_q) - 2\gamma(\tau_q - \tau_d)(\varepsilon^2\tau_d\tau_q - 1), \\ c(\gamma, \varepsilon) &= 2\varepsilon^2\tau_q^2 - \varepsilon^2\tau_d\tau_q + 1 - 2\gamma\varepsilon(\tau_q^2 - \tau_d^2), \\ d(\gamma, \varepsilon) &= \gamma(\tau_q - \tau_d)(\varepsilon^2\tau_d\tau_q - 1) - \varepsilon(\varepsilon^2\tau_d\tau_q - 1) - \varepsilon(\varepsilon^2\tau_d\tau_q^2 + 2\tau_d - \tau_q) \end{aligned}$$

где решение последнего уравнения будет следующим

$$\theta_{\mu_{\max}}(\gamma, \varepsilon) = 2z(\gamma, \varepsilon)\cos(\rho(\gamma, \varepsilon)/3 + \pi/3) - b(\gamma, \varepsilon)/3a(\gamma, \varepsilon) \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} \rho(\gamma, \varepsilon) &= \arccos[q(\gamma, \varepsilon)/z^3(\gamma, \varepsilon)], \\ z(\gamma, \varepsilon) &= \sqrt{|f(\gamma, \varepsilon)|\text{sign}[q(\gamma, \varepsilon)]}, \\ f(\gamma, \varepsilon) &= \frac{13a(\gamma, \varepsilon)c(\gamma, \varepsilon) - b^2(\gamma, \varepsilon)}{9a^2(\gamma, \varepsilon)}, \\ q(\gamma, \varepsilon) &= \frac{b^3(\gamma, \varepsilon)}{27a^3(\gamma, \varepsilon)} - \frac{b(\gamma, \varepsilon)c(\gamma, \varepsilon)}{6a^2(\gamma, \varepsilon)} + \frac{d(\gamma, \varepsilon)}{2a(\gamma, \varepsilon)}. \end{aligned}$$

Расчеты показывают, что предлагаемое приближение обеспечивает необходимую с инженерной точки зрения точность.

На рис. 3 приведены механические характеристики ВД $\mu(\varepsilon)$ при различных значениях угла коммутации. К семейству механических характеристик добавлена кривая механической характеристики ВД при

оптимальной настройке угла коммутации $\theta = \theta_{\mu_max}$, обеспечивающей максимальный электромагнитный момент двигателя.

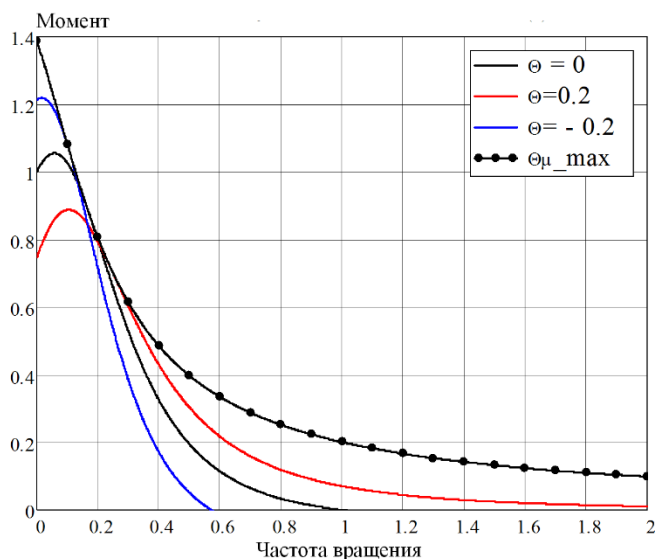


Рис. 3. Механические характеристики ВД

На рис. 4 приведены механическая и регулировочная характеристики ВД при оптимальной настройке $\theta = \theta_{\mu_max}$ на максимум момента.

Для частного случая – неявнополюсного ВД ($\tau_d = \tau_q = \tau_e$) – уравнение (5) решается точно:

$$\theta_{\mu_max}^* = \arctg(\varepsilon \tau_e) \quad (8)$$

С. Обеспечение максимального КПД двигателя

Помимо задачи расширения диапазона регулирования электропривода по скорости и моменту важнейшей задачей является задача обеспечения энергоэффективности управления. В случае вентильного электропривода на основе неявнополюсного ВД с целью снижения омических потерь рекомендуется поддерживать в процессе регулирования ВД ток намагничивания равным нулю ($i_d = 0$), так как эта составляющая тока статорной цепи не участвует в создании электромагнитного момента.

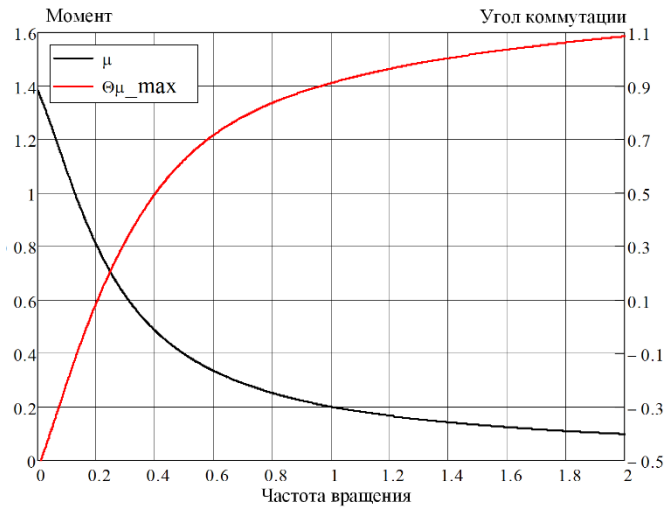


Рис. 4. Механическая и регулировочная характеристики ВД при настройке на максимум момента

Такой подход к управлению ВД получил большое распространение в инженерной практике.

В случае явнополюсного ВД, очевидно, эта рекомендация является ошибочной.

Получим в общем виде аналитическое выражение для расчета КПД. КПД по полной, активная плюс реактивная составляющие, потребляемой мощности будет:

$$\eta = \frac{P_{\Sigma}}{P_{II}} = \frac{M_{\Sigma} \omega_r}{\frac{3}{2} U \sqrt{I_q^2 + I_d^2}} \quad (9)$$

где P_{Σ} , P_{II} – соответственно, электромагнитная и полная потребляемая мощность ВД.

В принятой системе относительных единиц с учетом ранее полученных соотношений (2) – (4) выражение КПД получит вид

$$\eta = \frac{\varepsilon[\gamma(\varepsilon\tau_d \sin \theta + \cos \theta) - \varepsilon][\gamma(\tau_d - \tau_q)]}{\gamma(1 + \tau_d \tau_q \varepsilon^2) \sqrt{[\gamma(\varepsilon\tau_d \sin \theta + \cos \theta) - \varepsilon]^2 + (\varepsilon\tau_q \cos \theta - \sin \theta)^2 + \varepsilon^2 \tau_q^2}} + (\gamma(\varepsilon\tau_q \cos \theta - \sin \theta) - \varepsilon^2 \tau_q)^2 \quad (10)$$

На рис. 5 приведены зависимости КПД от угла коммутации для различных частот вращения ВД.

Необходимо найти максимум КПД ВД по углу коммутации, что представляет собой непростую задачу, учитывая сложность зависимости $\eta(\theta)$.

Для более простого случая неявнополюсного ВД была рекомендована следующая оптимальная настройка угла коммутации [5]:

$$\theta_{\eta_max}^* = \arctg \varepsilon \tau_3 - \arcsin \frac{\varepsilon^2 \tau_3}{\gamma \sqrt{1 + \tau_3^2 \varepsilon^2}} \quad (11)$$

Примем аналогичную структуру оптимального регулировочного соотношения для случая явнополюсного ВД:

$$\theta_{\eta_max} = \theta_{\mu_max} - \arcsin \frac{\varepsilon^2 \tau_q}{\gamma \sqrt{1 + \tau_e \tau_u \varepsilon^2}} \quad (12)$$

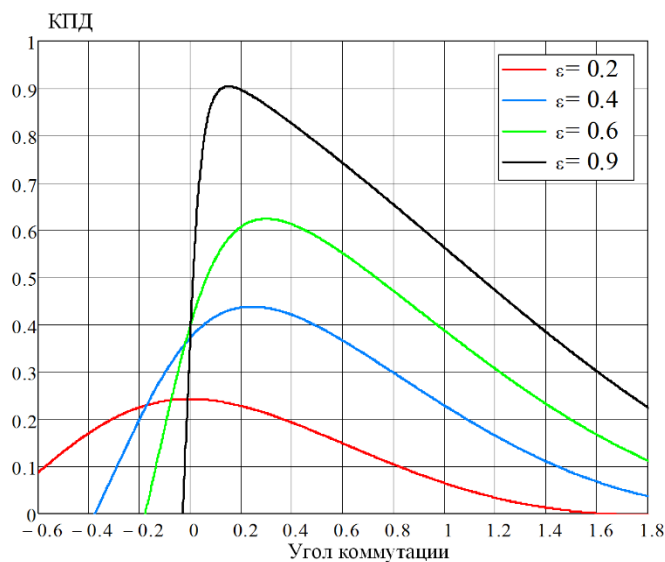


Рис. 5. Зависимость КПД от угла коммутации

На следующем рисунке приведена зависимость КПД от частоты вращения для различных значений угла коммутации, включая его оптимальное значение.

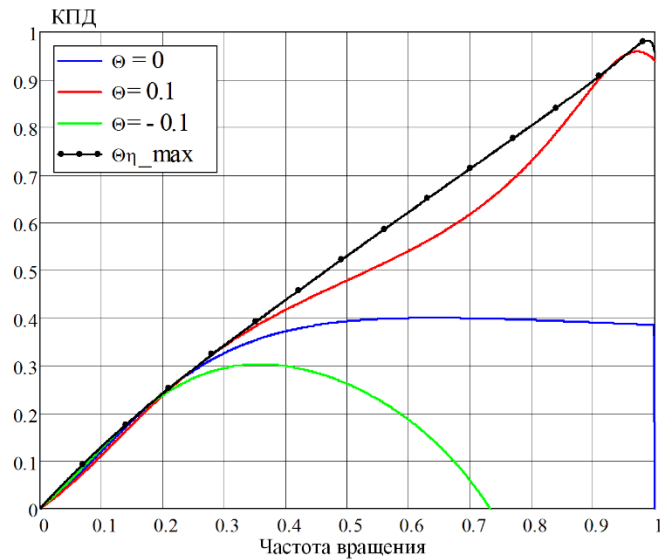


Рис. 6. Зависимость КПД от частоты вращения

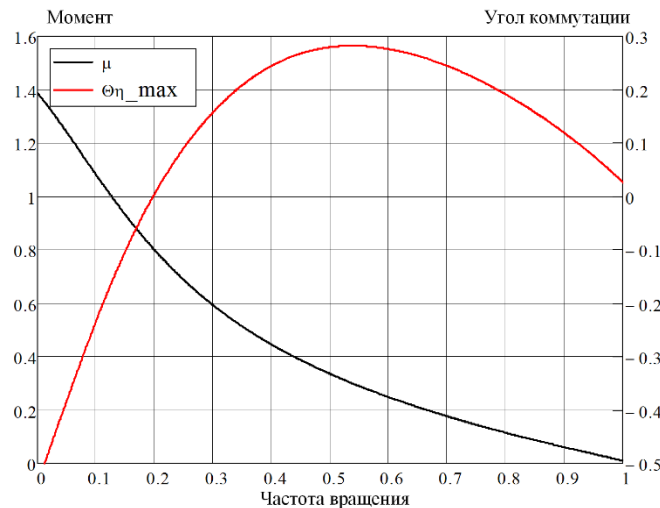


Рис. 7. Механическая и регулировочная характеристики ВД при настройке на максимум КПД

На рис. 7 приведены механическая и регулировочная характеристики ВД при оптимальной настройке $\theta = \theta_{\eta_max}$ на максимум КПД.

III. РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Подводя итог, необходимо отметить, что поставленные в исследовании задачи решены и получены относительно простые аналитические выражения для регулирования угла коммутации в процессе фазового управления вентильным электроприводом:

- из условия обеспечения максимального электромагнитного момента явнополюсного ВД – выражение (7);
- из условия обеспечения максимального электромагнитного момента неявнополюсного ВД – выражение (8);
- из условия обеспечения максимального КПД по полной потребляемой мощности неявнополюсного ВД – выражение (11);
- из условия обеспечения максимального КПД по полной потребляемой мощности явнополюсного ВД – выражение (12).

Достоверность полученных результатов подтверждается корректным использованием расчетных методов и математических моделей при общепринятых допущениях, большим объемом имитационного моделирования.

Полученные оптимальные регулировочные соотношения направлены на решение поставленных в исследовании задач расширения диапазона регулирования вентильного электропривода по частоте вращения и моменту и повышения энергетических параметров привода, и могут быть использованы при реализации фазового управления или при оптимальной настройке рабочих режимов привода.

Направление дальнейших исследований может быть связано рассмотрением предельных режимов тягового вентильного электропривода в условиях глубокого регулирования параметров электропитания, характеризуемого существенным насыщением магнитной системы, несинусоидальностью токов и потокосцеплений обмоток, изменений магнитных и электрических свойств материалов вследствие нагрева частей двигателя. В этих режимах работы стационарная модель ВД нуждается в корректировке, так как индуктивные параметры двигателя существенно отличаются от номинальных значений [6].

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.P. Vertokhvostov, "Energy-saving traction electric drive of dc rolling stock of urban electric transport" in *Scientific problems of transport in siberia and the far east*. 2008. no. 1. pp. 255-258.
2. T.L. Alekseeva, N.L. Ryabchenok, L.A. Astrakhantsev, K.P. Yakobchuk, B. Gantumur, "Energy-efficient traction electric drive of railway rolling stock" in *IMPROVING THE EFFICIENCY OF OPERATION OF COLLECTOR ELECTROMECHANICAL ENERGY CONVERTERS materials of the IX International Scientific and Technical Conference*. 201. Publisher: Omsk State University of Railway Transport. 201. pp. 277-283.
3. D.Yu. KAPITSKY, "Traction electric drive of an alternating current tram car" in *YOUTH, INNOVATION, TECHNOLOGY* Collection of scientific papers of the International Scientific and Technical Conference. Edited by E.G. Gurova, S.V. Makarov. 2019. *YOUTH, INNOVATION, TECHNOLOGY Novosibirsk, April 23-25, 2019*. pp.122-124
4. S.G. Voronin, A. I. Sogrin., D.A. Kurnosov., N.V. Klinachev., N.Yu. Kuleva, "Digital Models for Describing Working Processes and Valve Drive Characteristics" in *Proceedings - 2018 Global Smart Industry Conference*. 2018 pp.351-357
5. V.O. Goncharov, E. B.Korotkov, N. S. Slobodzyan, A.V. Chetvertukhin, "Sensor-free valve drive control system" in *Young people. Space. Proceedings of the X All-Russian Youth Scientific and Technical Conference. Ser. "Library of the journal "Voenmeh. Bulletin of BSTU"* 2018. No. 50 v. 2. pp. 212-217
6. C. Busca, Open Loop Low Speed Control for PMSM in High Dynamic Applications, Denmark: Aalborg university. 2010. p. 110.
7. T. Martin, R. Burke "Practical Field Weakening Current Vector Control Calculations for PMSM in Vehicle Applications," in *2013 World Electric Vehicle*, Barcelona, Spain, November 17-20. 2013. pp 91-98.
8. G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, B. Boazzo "Performance comparison between Surface Mounted and Interior PM motor drives for Electric Vehicle application" in *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. v. 59. no. 2. pp. 803-811.
9. G. Voronin, D.A. Kurnosov, A.S. Kulmukhametova "Vector control of synchronous motors with excitation from permanent magnets" in *Electrical engineering*. 2013. No. 10. pp. 50-54.
10. S.G. Voronin, D.A. Kurnosov "Regulation of mechanical coordinates of a valve electric drive by vector control method" in *Bulletin of SUSU. The series "Energy"*. 2015. Issue 15. No. 3. pp. 52-58.
11. N. M. Dmitruk, F. M. Kirillova, "Optimization of phase-limited control systems in *Reports of the national academy of sciences of belarus. Founders: National Academy of Sciences of Belarus* 1999.3. №3. pp. 5-8.
12. S.A. Gagarin, A.V. Krivilev "Influence of vector control methods on the energy characteristics of a mechatronic drive module with a valve motor" in *Materials of the 7th scientific and technical conference "mechatronics, automation, control" (uia-2010) 2010* Publisher: JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor" St. Petersburg, October 12-14, 2010. pp. 116-119
13. D.S. SOLDATENKO, "Vector control systems for tractor traction electromechanical drive" in *Current issues of machine science*. 2019. 8. pp. 125-128
14. A.V. Belonogov, "Overview of drive control systems for warehouse transport robotic platforms" in *Technical sciences in russia and abroad Materials of the VI International Scientific Conference*. 2016 Publishing House: Publishing house "Buki-Vedi". Moscow, November 20-23. 2016. pp.11-14.
15. S.G. Voronin, D.A. Kurnosov, A.S. Kulmukhametova, "Vector control of asynchronous motors with excitation from permanent magnets" in *Electrical engineering. Founders: Firm Sign*. 2013. 10. pp.50-54.
16. A.D. CHERNYSHEV, "Calculation of the mechanical characteristics of the traction electric motor of the electric transmission of the vehicle" in *Bulletin of the south ural state university. series: mechanical engineering*. 2018. 18. №1. pp. 5-16.

17. V. I. Sedov, V. I. Zakharov, "Determination of the stability of the traction asynchronous motor" in *Bulletin of the all-russian research and design institute of electric locomotive engineering founders: all-russian research and design institute of electric locomotive engineering*. 2012. 1. №63. pp. 23-31.
18. M. R. Mugalimova, R. G. Mugalimov, "Formation of traction characteristics of an asynchronous motor at the stage of its design" in *Actual problems of modern science, technology and education founders: magnitogorsk state technical university named after g.i. nosov*. 2013. 2. №71. pp. 45-48.
19. I. YU. KRUCHININA, L. YU. STEINLE, "Improving the shape of the emf curve of the stator winding phases and reducing additional losses in a single-pole synchronous generator" in *Electricity. Founders: Russian Academy of Sciences, Department of Physical and Technical Problems of Power Engineering of the Russian Academy of Sciences, Federation of Energy and Electrotechnical Societies*. 2018. 11. pp. 45-48.
20. D. Sh. ABDULLIN, I. A. BUTYLIN, M. A. VAGANOV, "Optimal transverse geometry of synchronous single-pole motors" in *Izvestiya spbgetu leti. Founders: St. Petersburg State Electrotechnical University "LETI" named after V.I. Ulyanov (Lenin)*. 2017. 6. pp. 38-43.

Левченко Л. И., Фаррахова Р. А.
ФГБОУ ВО «УУНиТ»

ПЕРСПЕКТИВЫ ИНДУКТИВНОГО МЕТОДА ИЗМЕРЕНИЯ УГЛОВЫХ ПЕРЕМЕЩЕНИЙ¹

Аннотация: В данной работе проанализированы перспективы использования индуктивного метода измерения угловых смещений, рассмотрены основные известные конструкции датчиков положения ротора, основанные на индуктивном методе, выявлены их преимущества и недостатки и сделаны выводы перспективах их использования в составе современных электромеханических преобразователей энергии.

Ключевые слова: индуктивный метод, датчик положения ротора, конструкции преобразователей угла, вращающийся линейный дифференциальный трансформатор, синус-косинусный вращающийся трансформатор, векторное управление с обратной связью.

I. ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения точного регулирования скорости вращения электромеханических преобразователей энергии необходимо наличие обратной связи, которая отвечает за определение углового перемещения ротора. При наличии высоких требований к надежности и точности датчиков положения ротора (ДПР) целесообразно использовать конструкции основанных на индуктивном методе. Далее в работе рассмотрены используемые существующие варианты исполнения индуктивных ДПР.

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Резольвер является одним из таких вариантов. Он состоит из ротора и статора цилиндрической формы, на которых расположены многослойные обмотки в пазах [1]. Обмотка распределяется синусоидально. За один полный оборот ротора создаются одна или несколько полных кривых синуса и косинуса. В первом случае имеет место односкоростное исполнение, во втором – многоскоростное. Абсолютная обратная связь обеспечивается только односкоростным исполнением, однако многоскоростной резольвер обеспечивает лучшую точность. Но при этом возможность многоскоростного исполнения резольвера ограничена размерами прибора.

Два набора обмоток расположены под углом 90 градусов друг к другу. В одном из этих наборов обмоток называются синусными, другие – косинусными обмотками. Один набор обмоток ротора необходим для улучшения точности и, как правило, выполняется короткозамкнутым.

Преимуществами резольвера являются: точность, долговечность, прочность, практически бесконечная разрешающая способность, ограниченная лишь качеством АЦП. Недостатками резольвера являются: высокая цена, большие габариты, требования к наличию схемы обработки сигнала и возбуждения.

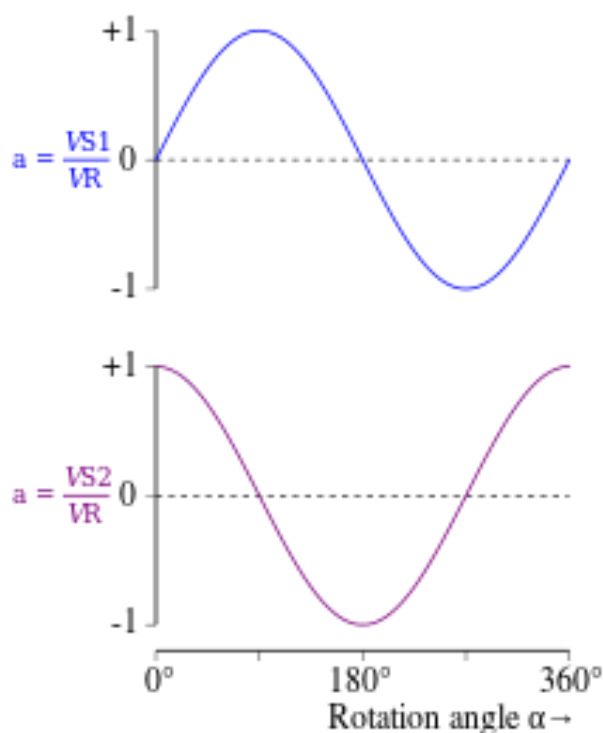


Рис. 1. Сигналы на выходных обмотках статора резольвера

Также известен *Rotary Variable Differential Transformer (RVDT)*, который представляет собой электромеханический преобразователь [2], выдающий линейную зависимость выходного напряжения от углового перемещения.

Такой датчик состоит из неподвижной обмотки, на которую подается переменное напряжение, двух неподвижных вторичных обмоток, соединенных между собой, на выводах которых выводится напряжение равное разности напряжений в этих обмотках, а также ферромагнитного сердечника, закрепленного на передающем угловое перемещение валу.

Преимуществами *RVDT* являются: простота конструкции и как следствие их надежность, устойчивость при эксплуатации в неблагоприятных условиях ввиду расположения обмоток на неподвижной части, высокая точность, долговечность, компактность. К недостаткам можно отнести отдельный блок электроники, необходимый для формирования и обработки сигнала, ограничение рабочего диапазона углового перемещения [3].

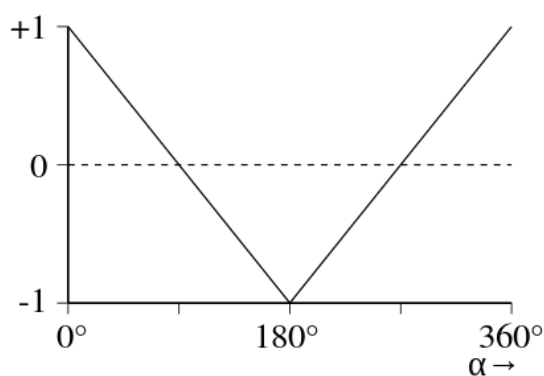


Рис. 2. График зависимости выходного напряжения RVDT от углового перемещения

В статье рассмотрены различные модификации индуктивных датчиков положения ротора. Были рассмотрены принципы их работы, приведены преимущества и недостатки. В целом анализ показал, что для точного определения положения ротора при наличии суровых условий работы необходимо использовать индуктивные датчики, так как они соответствуют требованиям к точности и надежности.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Афанасьев А. А., Ваткин В. А., Матюнин А. Н. Бесконтактный синусно-косинусный вращающийся трансформатор (резольвер) // Патент РФ № 193505 МПК H02K 24/00 H02K 1/24, опубл. 2019.10.31
2. Сысоева С. В. Автомобильные датчики положения. современные технологии и новые перспективы. Часть 8. Классические индуктивные преобразователи - надежный запас // Компоненты и Технологии. 2005
3. «RVDT - Construction, Working, Application, Advantages and Disadvantages» [Электронный ресурс]. URL: <https://www.electrical-technology.com/2019/08/rvdt-construction-working-application-advantages-and-disadvantages> (Дата обращения: 26.02.2021 г.)

ИСТОЧНИКИ ПИТАНИЯ, ОСНОВАННЫЕ НА МОДУЛЯХ ПЕЛЬТЬЕ¹

Аннотация: В данной статье проведен краткий обзор существующих источников питания, основанных на модулях Пельтье, а также патенты и научные статьи в данной области. Рассмотрены основные требования, предъявляемые к ним, их преимущества и недостатки.
Ключевые слова: источник питания, термогенератор, модули Пельтье, эффект Зеебека.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день, вопрос исчерпания необходимых для современной жизни энергетических ресурсов, таких как нефть, природный газ, уголь стоит очень остро и актуально. Это позволяет повысить интерес для разработки новых технологий, основанных на использовании альтернативных природных ресурсов: солнечной энергии, гидроэлектроэнергии, энергии ветра, биоэнергетики, геотермальной энергии.

В данной статье рассматриваются источники питания, основанные на эффекте Зеебека. Добиться этого позволяют модули Пельтье, работающие в данном случае как генераторы. Эти изобретения могут использоваться как в виде источника энергии, интегрированного в какую-либо систему, так и являться переносным источником энергии, имеющий малый вес и не нуждающийся в подзарядке как портативные аккумуляторы (powerbank). При интеграции в какую-либо систему, например система охлаждения автомобиля, данный источник энергии будет работать по принципу разницы температур теплоносителя, разогреваемого от двигателя автомобиля. Если он является переносным источником энергии, то прогревать теплоноситель можно при помощи прогрева теплоносителя (например воды) при помощи газовой горелки.

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

II. АНАЛИЗ СУЩЕСТВУЮЩИХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ НА ЭЛЕМЕНТАХ ПЕЛЬТЬЕ

В настоящее время на рынке имеются следующие виды источников питания, основанных на элементах Пельтье:

Маленький термоэлектрический генератор Seebeck

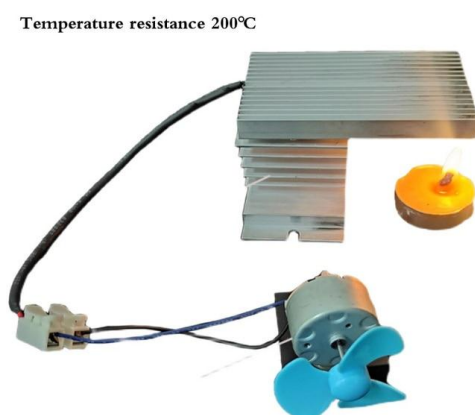


Рис. 1. Маленький термоэлектрический генератор Seebeck

Данное устройство подходит для исследований в области производства термоэлектрической энергии и демонстрации студенческих научных экспериментов. Фактическая разница температур между двумя сторонами составляет около 30 градусов, что позволяет запустить маленький вентилятор. Генерируемая мощность составляет 0.2 В, вес устройства 0,5 кг.

Данная конструкция не может использоваться как постоянный источник питания, интегрированный в различные системы. Также данный товар нельзя использовать как мобильный источник питания, так как он имеет лишь один модуль Пельтье и слабый перепад температур, что существенно снижает коэффициент полезного действия самого источника питания.

Полупроводниковый термоэлектрический генератор. Обучающее электронное оборудование



Рис. 2. Полупроводниковый термоэлектрический генератор

В описании данного устройства указано, что он может использоваться лишь в целях обучающего лабораторного стенда в университете и средней технической школе. Вес данного устройства 1,2 кг.

Его конструкция может использоваться лишь в качестве демонстративного термоэлектрического генератора и не имеет возможности интеграции в различные системы для выработки электроэнергии, так как имеет низкую эффективность и большие габариты. Генерируемая мощность составляет 0,2-0,4 В.

Термоэлектрический элемент «Сделай сам»

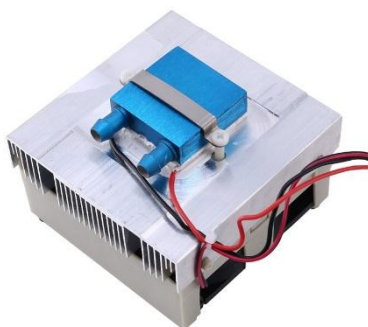


Рис. 3. Термоэлектрический элемент Пельтье вентилятор для охлаждения DC 12 В

Заявленная мощность данного источника питания 0,5 В. Габариты данного устройства 10 см. в ширину и 10 см. в длину, вес 0,4-0,5 кг.

Данный источник питания имеет лишь один элемент Пельтье, что снижает его эффективность. Также он имеет вентилятор охлаждения, который является потребителем электроэнергии и снижает генерируемую мощность.

Стоит отметить, что горячим теплоносителем данного устройства является жидкость, охлаждение же обеспечивается за счет вентилятора.

Термоэлектрический генератор электроэнергии АА240.
Полупроводниковый охладитель Пельтье.

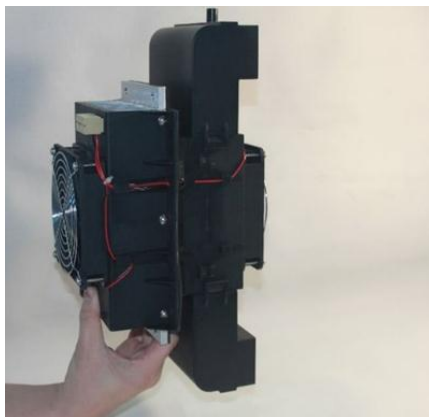


Рис. 4. Термоэлектрический генератор электроэнергии АА240

В описании устройства указано, что его основным назначением является охлаждение различных систем, так как вырабатываемая мощность очень мала и фактически позволяет лишь обеспечить автономную работу самого устройства.

Данное устройство является потребителем электроэнергии и может использоваться лишь в качестве системы охлаждения. Хотя производитель заявляет возможность генерации электроэнергии, учитывая конструкцию изделия, данный эффект имеет маленькую эффективность.

Проведя анализ существующих на рынке источников питания, основанных на элементах Пельтье, можно сделать вывод, что данная область развита слабо и на данный момент времени не существует постоянных источников питания, основанных на элементах Пельтье. В большинстве случаев модули Пельтье служат для охлаждения электронных устройств и уменьшения температуры в микросхемах. Они часто используются в системах охлаждения и кондиционирования, выполняя роль кулера. Существующие источники питания на рынке предлагаются лишь в виде демонстративных студенческих стендов, созданных для обучения.

III. АНАЛИЗ ПАТЕНТОВ И СТАТЕЙ НА ТЕМУ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ, ОСНОВАННЫХ НА ЭЛЕМЕНТАХ ПЕЛЬТЬЕ

В данном пункте проводится анализ существующих патентов и научных статей, связанные с источниками питания, основанных на элементах Пельтье.

Рассмотрим патент 20160520 «Термоэлектрический генератор» [1]. Данное изобретение предназначено для использования в транспортном машиностроении для преобразования тепловой энергии отработавших газов двигателя внутреннего сгорания в электрическую. Его конструкция представлена на рисунке 2.1

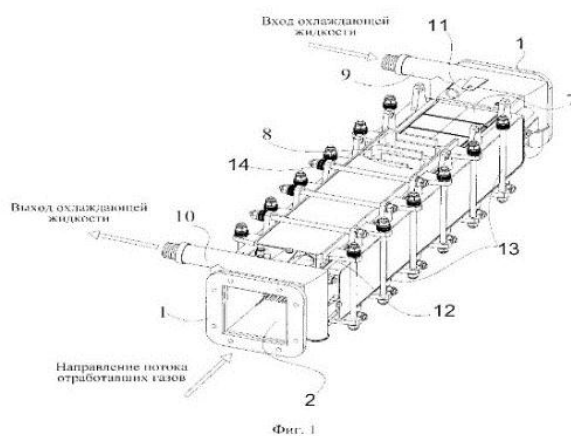


Рис. 5. Конструкция термоэлектрического генератора патента 20160520

В данной конструкции модули Пельтье расположены по всем внешним сторонам теплообменного аппарата квадратного сечения. Конструкция теплообменного аппарата будет эффективна исключительно с теплоносителями, находящимися в газообразном состоянии.

Рассмотрим патент 20030110 «Термоэлектрический автономный источник питания» [2]. В данном изобретении термоэлектрический автономный источник питания содержит корпус, элементы Пельтье с электрическими выводами, установленные на наружной поверхности корпуса и соединенные между собой параллельно, или последовательно, или последовательно-параллельно, внутри корпуса установлен изотопный или химический источник тепловой энергии.

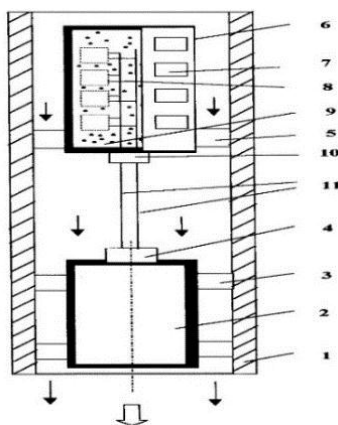


Рис. 6. Конструкция источника питания патента 20030110

Недостатками данной конструкции является низкий ресурс работы механических и химических частей генератора, а также излишний шум.

Рассмотрим патент 20140627 «Автономный самозаряжающийся источник питания и носимое на теле человека электронное устройство» [3]. Данное устройство работает на автономном источнике питания, функционирующее за счет использования тепловой энергии, вырабатываемой человеческим телом. Он содержит аккумулятор, заряжаемый генератором, вырабатывающим электрический ток, который приводится в действие механическим движением, передающимся от теплового двигателя Стирлинга, рабочее тело которого заключено в изолированном пространстве, а двигатель приводится в действие путем попеременного нагрева и охлаждения рабочего тела, при этом нагрев рабочего тела осуществляется тепловой энергией, выделяемой телом человека, а охлаждение рабочего тела осуществляется через охладитель окружающим пространством.

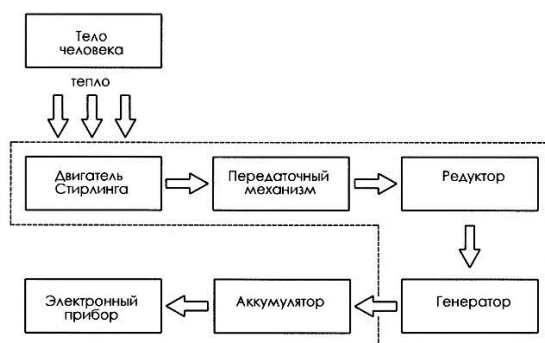


Рис. 7. Конструкция источника питания патента 20140627

Конструкция данного изобретения имеет крайне узкую область применения. Тепло вырабатываемое телом человека имеет невысокую температуру, что значительно снижает КПД данного источника питания.

Рассмотрим патент 20090610 «Термоэлектрический генератор» [4]. Его сущность заключается в том, что термоэлектрический генератор содержит генераторный термоэлектрический модуль, источник тепловой энергии и устройство отвода избыточного тепла, при этом холодная сторона генераторного термоэлектрического модуля соединена с холодной стороной охлаждающего термоэлектрического модуля, питаемого от генераторного термоэлектрического модуля, с возможностью отвода избытка тепла от горячей стороны охлаждающего термоэлектрического модуля. В его цепи питания охлаждающего термоэлектрического модуля может быть установлено устройство регулирования тока.

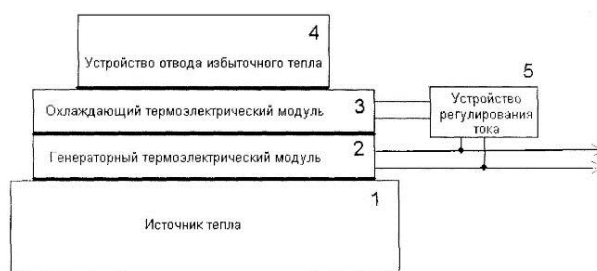


Рис. 8. Схема работы предлагаемого термогенератора патента 20090610

Задачей данного патента является увеличение эффективности работы термоэлектрического генератора за счет увеличения разности температур на горячей и холодной сторонах генераторного термоэлектрического модуля. Он не имеет конкретно разработанной схемной конструкции и описывает работу модулей Пельтье в целом.

Также в общем доступе имеется известная статья «History of development of thermoelectric materials for electric power generation and criteria of their quality» (История развития термоэлектрических материалов для электроэнергетики и критерии их качества) [5]. Она написана авторами из Федерального

университета Риу-Гранди-ду-Сул – UFRGS, Бразилия, Александром Полозиным, Сюзанной Сиротинской и Лирио Шеффером.

В ней описывается принцип работы модулей Пельтье, истории его создания и нынешние области применения. Большое внимание уделяется тому, что генераторы электроэнергии на эффекте Зеебека не зависят от природы расходуемого тепла и поэтому могут применяться в различных областях. Отмечается, что модули Пельтье можно использовать не только для преобразования тепла в электричество, но и для обратного процесса, для охлаждения или нагрева. Отмечено, что растущая озабоченность по поводу истощения необходимых для современной жизни энергетических ресурсов, таких как нефть, природный газ и уголь, подпитывает разработку новых технологий, основанных на использовании альтернативных природных ресурсов: солнечной энергии, гидроэлектроэнергии, энергии ветра, биоэнергетики, геотермальной энергии. Тепловая энергия занимает особое место в деятельности человека, так как сопровождает большинство промышленных процессов и процессов, происходящих в природе. В большинстве случаев отработанное тепло теряется без какой-либо экономической выгоды. Этот энергоресурс ничего не стоит и может быть использован как для снижения воздействия энергетического кризиса, так и для нагрева окружающей среды. Поэтому преобразование отработанного тепла в электроэнергию, является актуальным вопросом и изучается многими учеными современности. Также производится много исследований на тему материалов термоэлектриков, которые позволят увеличить их КПД. Данная статья подтверждает актуальность вопросов изучения работы и конструктивной схемы генераторов, основанных на модулях Пельтье.

2.6 По проведенному анализу патентов и научных статей на тему термогенераторов на основе модулей Пельтье можно сделать вывод, что данный раздел глубоко изучается многими учеными со всего мира. Учитывая стремления всего мира повысить энергоэффективность и энергосбережение,

разработка источников питания на основе модулей Пельтье является актуальной.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пат. 20160520 Российская Федерация, МПК F01N 5/02(2006.01), H01L 35/28(2006.01). Термоэлектрический генератор [Текст] / Хрипач Н.А.; заявитель и патентообладатель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ)" (RU); заявл. 2015.10.29; опубл. 2016.05.20.
2. Пат. 20090610 Российская Федерация, МПК H01L 35/02(2006.01). Термоэлектрический генератор [Текст] / Башков В.М.; заявитель и патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования "Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана" (RU) Общество с ограниченной ответственностью Научно-Производственное объединение "Кристалл" (RU); заявл. 2008.12.15; опубл. 2009.06.10.
3. Пат. 20160520 Российская Федерация, МПК E21B 47/00(2000.01). Термоэлектрический автономный источник питания [Текст] / Григашкин Г.А.; заявитель и патентообладатель Закрытое акционерное общество Научно-производственная фирма "Самарские горизонты" (RU); заявл. 2002.09.16; опубл. 2003.01.10.
4. Пат. 20140627 Российская Федерация, МПК H02N 11/00(2006.01), H01M 6/00(2006.01). Автономный самозаряжающийся источник питания и носимое на теле человека источника питания [Текст] / Чайкин К. Ю.; заявитель и патентообладатель Общество с ограниченной ответственностью "Константин Чайкин" (RU); заявл. 2013.10.30; опубл. 2014.06.27.
5. Alexandre Polozine, Susanna Sirotinskaya, Lirio Schaeffer « History of development of thermoelectric materials for electric power generation and criteria of their quality» от 17.09.2014

Медведев А. Е., Богданов А. Р., Кирьянова К. Э.

ФГБОУ ВО «УУНиТ»

ВЛИЯНИЕ СПОСОБА ЛИТЬЯ НА ТЕРМИЧЕСКУЮ СТАБИЛЬНОСТЬ СПЛАВОВ СИСТЕМЫ AL-FE, ПОДВЕРГНУТЫХ ИНТЕНСИВНОЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ¹

Аннотация: В данной работе рассмотрено влияние способа литья на микроструктуру, свойства и термическую стабильность сплавов системы Al-Fe. В качестве материалов исследования был выбран сплав Al-1.7Fe, полученный классическим литьем в водоохлаждаемую изложницу (Л) и литьем в электромагнитный кристаллизатор (ЭМК). Испытания на термическую стабильность проводились на образцах, подвергнутых интенсивной пластической деформацией кручением. Показано, что сплав ЭМК не только не разупрочняется в результате термического воздействия, но и повышает прочность, в то время как прочность сплава Л падает в два раза. Анализ микроструктуры и свойств исследуемых сплавов позволяет сделать предположение, что природа данного эффекта заключается в

¹Работа выполнена на базе лаборатории «Металлы и сплавы при экстремальных воздействиях» Евразийского центра компетенций УУНиТ, Россия при поддержке Министерства высшего образования и науки Российской Федерации в рамках госзадания № 075–03-2021-014/4

разнице протяженности межфазной поверхности исследуемых сплавов, обусловленной разными методами литья.

Ключевые слова: алюминиевый сплав, электромагнитная кристаллизация, термостойкость, механические свойства, интенсивная пластическая деформация, электропроводность.

I. ВВЕДЕНИЕ

За последние десятилетия значительно возросло использование проволоки из алюминиевых сплавов с содержанием Fe в интервале 0,3-1,5 масс. %, таких как марки 8030 и 8176 [1-3]. Сплавы системы Al-Fe широко применяются в качестве линий электропередач при строительстве жилых и промышленных зданий, больниц, гостиниц, стадионов. Алюминий все больше вытесняет другие металлы и сплавы как материал для изготовления обмоток силовых трансформаторов, электрических систем автомобилей, авиации, космической техники [4–7]. Проводники, изготовленные из материалов на основе алюминия, обладают малым весом, достаточной электропроводностью и низкой стоимостью. Однако промышленная эксплуатация алюминиевых сплавов ограничена их относительно низкой механической прочностью и термической стабильностью, что делает их менее привлекательными, нежели проводник на медной основе.

В связи с этим наибольший практический интерес представляет разработка алюминиевых сплавов, обладающих, наряду с хорошей электропроводностью, высокими прочностными характеристиками и повышенной термостойкостью [8]. Решением этой проблемы могли бы служить сплавы системы Al-Fe, поскольку они относительно дешевы и имеют потенциал для дальнейшего улучшения свойств. Железо имеет близкую к нулю растворимость в Al, что сводит на нет негативное влияние твердого раствора на электропроводность этих сплавов [9].

Согласно [10–12], распределение, размер, форма, объемная доля алюминидов железа в алюминиевой матрице являются важными факторами, определяющими уровень физико-механических свойств сплавов Al-Fe. Тип интерметаллидной фазы определяется химическим составом и условиями литья сплава, а морфология в большей степени определяется типом производства

(т. е. способом литья). В предыдущих работах было установлено [13,14], что морфология интерметаллидной фазы в литом состоянии оказывает существенное влияние на свойства исследуемого материала при последующей обработке (например, при больших деформациях).

Известно, что литье в водоохлаждаемую изложницу приводит к образованию крупных интерметаллидных частиц, не способствующих упрочнению материала и вызывающих преждевременное разрушение образца при холодной деформации (например, при холодном волочении). Использование метода электромагнитной кристаллизации (ЭМК) [15–17] позволяет измельчить интерметаллидную фазу и равномерно распределить ее в объеме материала за счет высокой скорости охлаждения.

Проводящие сплавы Al-Fe не относятся к числу самых прочных: сплавы Al-Mg-Si, Al-Zr или Al-РЗМ (редкоземельные металлы) обладают более высоким уровнем механической прочности [18–20]. Обычные сплавы Al-Fe также не демонстрируют превосходной термической стабильности [21,22]. Поэтому были предприняты многочисленные попытки улучшить сплавы Al-Fe путем контроля их микроструктуры [2,3,23–24]. В частности, к этим сплавам применяли наноструктурирование путем интенсивной пластической деформации кручением под высоким давлением (ИПДК) [2,3] или равноканальным угловым прессованием (РКУП). ИПДК обеспечивает более высокий уровень механической прочности, но накладывает существенные ограничения на геометрические параметры изготавливаемых образцов. Метод РКУП имеет преимущество при изготовлении объемных заготовок, но достигнутое сочетание механических и электрических свойств не на должном уровне.

В этом исследовании мы предлагаем объединить метод ЭМК с ИПДК, и сравнить полученные данные со сплавом, полученным классическим литьем (Л). Электромагнитное перемешивание приводит к измельчению микроструктуры и образованию высокодисперсных интерметаллидов Al-Fe.

Кроме того, достаточно высокая скорость охлаждения (103 К/с) позволяет получать сплавы с однородной мелкодисперсной структурой [15–17].

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

A. *Материалы и методики*

Часть заготовок сплава Al-1.7Fe (Л) в виде прутков диаметром 22 мм и длиной около 200 мм были изготовлены литьем в графитовую изложницу. Скорость охлаждения заготовки при реализации данного метода литья оставила около 20 К/с. Сплав готовили на основе первичного алюминия марки А99 (ГОСТ 11069-2001). Плавку проводили в электрической печи сопротивления (GRAFICARBO) в графитном тигле при 820-850 °С. Другая часть заготовок Al-1.7Fe (ЭМК) была получена в виде прутков диаметром 11 мм и длиной 2 м непрерывным литьем в электромагнитный кристаллизатор на предприятии ООО «НПЦ Магнитной гидродинамики» (г. Красноярск). Сплав готовили на основе первичного алюминия марки А85 и добавки мастер-сплава Fe80Al20 в необходимой пропорции. Перед литьем температура расплава превышала 800°С. Скорость литья в ЭМК составляла около 12,5 мм/с. Химический состав сплавов указан в Таблице 1.

Таблица 1

Химический состав исследуемых сплавов

Литье в	Al	Fe	Si	Cu	$\Sigma(\text{Zn, Ti, Ni, V})$
Графитовую изложницу (Л)	основа	1.71	0.12	0.01	< 0.03
Электромагнитный кристаллизатор (ЭМК)	основа	1.65	0.03	0.01	< 0.03

Интенсивная пластическая деформация кручением (ИПДК) была проведена при комнатной температуре на опытной установке СКРУДЖ-2000 на базе НИИ Физики Перспективных Материалов УГАТУ. Величина прикладываемого давления составила 6 ГПа, количество оборотов – 20, скорость вращения бойков – 1 об/мин.

Для определения уровня термостойкости часть образцов после двухэтапной обработки подвергали отжигу в электропечи Nabertherm B180 при температурах 230 °С в течение 1 часа в соответствии с требованиями международного стандарта IEC 62004:2007.

Исследование микроструктуры проводили методом сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) на микроскопе JSM-6490LV фирмы Jeol при ускоряющем напряжении 15 кВт.

Механические испытания проводили при комнатной температуре, со скоростью деформации 10⁻³ с⁻¹ на универсальной испытательной машине Instron 5982. Характеристики прочности (условные пределы текучести ($\sigma_{0,2}$) и предел прочности (σ_B)) и пластичности (относительные удлинение до разрушения (δ)) образцов определяли по результатам растяжения образцов с размерами рабочей части 2,0x1,0x6,0 мм³. Для получения достоверных результатов испытывали на каждую экспериментальную точку не менее трех образцов.

Удельную электрическую проводимость (ω) образцов сплава определяли с относительной погрешностью ± 2 %, используя измеритель удельной электропроводности цветных металлов и сплавов вихретоковый ВЭ - 27 НЦ /4-5 по ГОСТ 27333-8. Значение электропроводности образцов относительно отожженной меди (International Annealed Copper Standard) рассчитывалось по (1):

$$\text{IACS} = \omega_{\text{Al}} / \omega_{\text{Cu}} * 100 [\%] \quad (1)$$

где ω_{Al} – экспериментально определенное значение удельной электропроводности образца алюминиевого сплава ω_{Cu} – удельная электрическая проводимость отожженной меди, равная 58 МСм/м.

В. Экспериментальные результаты

На Рис.1 представлена микроструктура сплавов Л и ЭМК в исходном состоянии. В сплаве ЭМК интерметаллидная фаза выделена в виде пластинок длиной до нескольких микрон и толщиной до 150 нм, скопления которых образуют т.н. сетку, ячейки которой заполнены чистой алюминиевой фазой.

Видно, что структура сплава Л характеризуется аналогичной структурой, но с наличием крупных грубых включений интерметаллидной фазы (Рис. 1а). Толщина пластин также значительно больше, чем в сплаве Л.

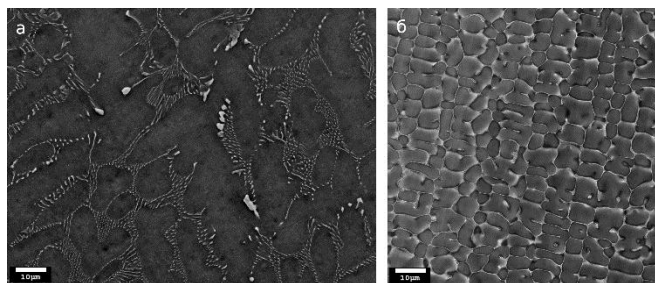


Рис. 1. Микроструктура сплавов Л (а) и ЭМК (б) в исходном литом состоянии, СЭМ

На Рис.2 представлена микроструктура сплавов Л и ЭМК после ИПДК и отжига при 230°C, 1ч. Видно, что ИПДК приводит к дроблению интерметаллидных частиц, и их перераспределению в объеме материала. В сплаве Л крупные частицы раздробились неравномерно, и после ИПДК в нем все еще наблюдаются крупные интерметаллидные частицы, в отличие от сплава ЭМК. Отжиг при 230°C приводит к уменьшению количества дефектов структуры, что делает интерметаллидные частицы более различимыми. К сожалению, без данных рентгеноструктурного анализа нельзя с точностью утверждать о том, произошли ли какие-либо морфологические изменения в частицах, однако, эта работа будет проведена в дальнейшем.

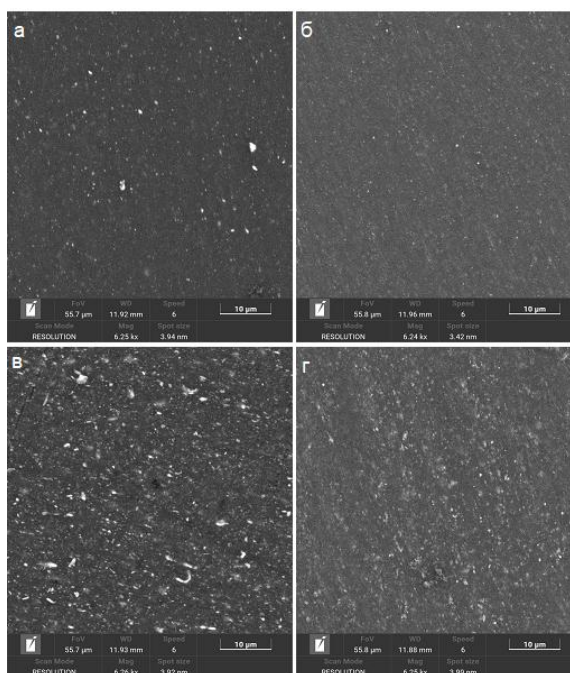


Рис. 2. Микроструктура сплавов Л (а) и ЭМК (б) после ИПДК и последующего отжига при 230°С, 1ч (в, г), соответственно, СЭМ

В Таблице 2 приведены данные измерения электрических и механических свойств исследуемых сплавов. В исходном состоянии сплав Л обладает пределом прочности в 1.5 раза меньшим, нежели сплав ЭМК, что связано с наличием крупных интерметаллидных включений, охрупчивающих сплав. Наличие интерметаллидной сетки в сплаве ЭМК приводит к увеличению прочности сплава, но, в то же время, снижает его электрическую проводимость и пластичность относительно сплава Л. В результате ИПДК происходит дробление и измельчение интерметаллидных частиц, рост плотности дефектов кристаллической решетки, и, как следствие, рост прочности сплавов. Увеличение прочности более выражено в сплаве Л – предел прочности после ИПДК составляет 650 МПа, в то время как предел прочности сплава ЭМК составляет 520 МПа. Можно предположить, что что неравномерность деформации, вызванная неравномерностью распределения и размеров интерметаллидных частиц, привела к более значительному упрочению в случае сплава Л. Электропроводность падает вследствие ИПДК на обоих сплавах, но падение на сплаве Л более значительное – 15% против 12% на сплаве ЭМК.

Тем не менее, электропроводность сплава Л после ИПДК остается выше благодаря тому, что электропроводность сплава Л в исходном состоянии выше. Пластичность сплава Л после ИПДК значительно уменьшается и составляет 5% - следствие наличия крупных интерметаллидных частиц. Так как распределение интерметаллидных частиц в сплаве ЭМК значительно более равномерное, то пластичность после ИПДК остается на достаточно высоком уровне – 16%. Отжиг при 230°С в течение 1 часа показывает значительную термическую стабильность сплава ЭМК – его прочность не только не падает, но растет на 100 МПа, в то время как прочность сплава Л падает в два раза. Наиболее вероятным объяснением данного эффекта будет образование пересыщенного твердого раствора железа в алюминии во время ИПДК.

Таблица 2

Электрические и механические свойства сплавов Л и ЭМК

Сплав	Свойства				
	ω , МСм/м	IACS, %	$\sigma_{0.2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
Л	32.4 ± 0.1	55.8 ± 0.1	55 ± 6	100 ± 2	32.4 ± 0.1
Л+ИПДК	23.4 ± 0.7	40.4 ± 0.2	564 ± 12	649 ± 6	5.0 ± 0.3
Л+ИПДК+230°С, 1ч	30.21 ± 0.8	52.1 ± 0.3	275 ± 8	325 ± 12	21 ± 0.3
ЭМК	28.77 ± 0.2	49.6 ± 0.1	82 ± 5	153 ± 3	21.1 ± 1.8
ЭМК+ИПДК	20.24 ± 0.1	37.3 ± 0.1	420 ± 15	520 ± 10	16.3 ± 1.3
ЭМК+ИПДК+230°С, 1ч	20.29 ± 0.2	34.9 ± 0.1	550 ± 11	615 ± 15	7 ± 0.1

Разница в сплавах Л и ЭМК заключается в том, что вследствие размеров интерметаллидных частиц межфазная граница в сплаве Л слишком мала, чтобы обеспечить диффузию железа в алюминий. В сплаве ЭМК межфазная граница развита, и обеспечивает достаточное количество путей для протекания диффузии.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сплав, полученный электромагнитной кристаллизацией, характеризуется повышенной термической стабильностью в деформированном состоянии, по сравнению со сплавом Л. Наиболее вероятно, что данный эффект связан с образованием и распадом пересыщенного твердого раствора железа в алюминии. Образование пересыщенного твердого раствора, в свою очередь, становится возможным только в сплаве в развитой межфазной поверхностью. Тем не менее, данное предположение нуждается в подтверждении, которое может быть получено с помощью рентгеноструктурного анализа исследуемых сплавов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. Shikagawa, G. Itoh, S. Suzuki, H. Kuroda, T. Horikoshi, Effect of Small Additions of Fe on the Tensile Properties and Electrical Conductivity of Aluminium Wires, *Materials Science Forum*. 519–521 (2006) 515–518. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/msf.519-521.515>.
2. J.M. Cubero-Sesin, Z. Horita, Age Hardening in Ultrafine-Grained Al-2 Pct Fe Alloy Processed by High-Pressure Torsion, *Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science*. 46 (2015) 2614–2624. <https://doi.org/10.1007/s11661-015-2876-6>.
3. J.M. Cubero-Sesin, H. In, M. Arita, H. Iwaoka, Z. Horita, High-pressure torsion for fabrication of high-strength and high-electrical conductivity Al micro-wires, in: *Journal of Materials Science*, Kluwer Academic Publishers, 2014: pp. 6550–6557. <https://doi.org/10.1007/s10853-014-8240-1>.
4. K. Yoshida, K. Doi, Improvement of ductility of aluminum wire for automotive wiring harness by alternate drawing, in: *Procedia Engineering*, Elsevier Ltd, 2014: pp. 706–711. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.064>.
5. Y. Shiohara, T. Taneda, M. Yoshizumi, Overview of materials and power applications of coated conductors project, *Japanese Journal of Applied Physics*. 51 (2012). <https://doi.org/10.1143/JJAP.51.010007>.
6. Y. Qiao, Y. Li, S. Sathiraju, J. Reeves, K. Lenseth, V. Selvamanickam, An overview of the coated conductor progress at IGC-SuperPower, *Physica C: Superconductivity and Its Applications*. 382 (2002) 48–51. [https://doi.org/10.1016/S0921-4534\(02\)01195-4](https://doi.org/10.1016/S0921-4534(02)01195-4).
7. J.M. Hesterlee, E.T. Sanders, F. Ridley Thrash, Bare overhead transmission and distribution conductor design overview, in: *Proceedings of the 1995 39th Annual Conference on Rural Electric Power Conference*, April 30, 1995 - May 2, 1995, IEEE, Nashville, TN, USA, 1995: pp. C1-1/ – 5.
8. B. Ke, L. Ye, Y. Zhang, X. Liu, Y. Dong, P. Wang, J. Tang, S. Liu, Enhanced strength and electrical conductivities of an Al-Zn-Mg aluminum alloy through a new aging process, *Materials Letters*. 304 (2021) 130586. <https://doi.org/10.1016/j.matlet.2021.130586>.
9. R.Z. Valiev, M. Murashkin, I. Sabirov, A nanostructural design to produce high-strength Al alloys with enhanced electrical conductivity, *Scripta Materialia*. 76 (2014) 13–16. <https://doi.org/10.1016/j.scriptamat.2013.12.002>.
10. I.A. Zhukov, A.A. Kozulin, A.P. Khrustalyov, A.E. Matveev, V. V. Platov, A.B. Vorozhtsov, T. V. Zhukova, V. V. Promakhov, The impact of particle reinforcement with Al₂O₃, TiB₂, and TiC and severe plastic deformation treatment on the combination of strength and electrical conductivity of pure aluminum, *Metals*. 9 (2019). <https://doi.org/10.3390/met9010065>.

11. M. V. Markushev, E. V. Avtokratova, S. V. Krymskiy, O.S. Sitdikov, Effect of precipitates on nanostructuring and strengthening of high-strength aluminum alloys under high pressure torsion, *Journal of Alloys and Compounds*. 743 (2018) 773–779. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2018.02.047>.
12. C.M. Cepeda-Jiménez, J.M. García-Infanta, A.P. Zhilyaev, O.A. Ruano, F. Carreño, Influence of the supersaturated silicon solid solution concentration on the effectiveness of severe plastic deformation processing in Al-7wt.% Si casting alloy, *Materials Science and Engineering A*. 528 (2011) 7938–7947. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.07.016>.
13. A. Medvedev, M. Murashkin, N. Enikeev, E. Medvedev, X. Sauvage, Influence of morphology of intermetallic particles on the microstructure and properties evolution in severely deformed Al-Fe alloys, *Metals*. 11 (2021). <https://doi.org/10.3390/met11050815>.
14. A.E. Medvedev, M.Y. Murashkin, N.A. Enikeev, I. Bikmukhametov, R.Z. Valiev, P.D. Hodgson, R. Lapovok, Effect of the eutectic Al-(Ce,La) phase morphology on microstructure, mechanical properties, electrical conductivity and heat resistance of Al-4.5(Ce,La) alloy after SPD and subsequent annealing, *Journal of Alloys and Compounds*. 796 (2019) 321–330. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2019.05.006>.
15. N. Belov, M. Murashkin, N. Korotkova, T. Akopyan, V. Timofeev, Structure and properties of Al-0.6 Wt.%Zr wire alloy manufactured by direct drawing of electromagnetically cast wire rod, *Metals*. 10 (2020) 1–11. <https://doi.org/10.3390/met10060769>.
16. N. Belov, T. Akopyan, N. Korotkova, M. Murashkin, V. Timofeev, A. Fortuna, Structure and properties of Ca and Zr containing heat resistant wire aluminum alloy manufactured by electromagnetic casting, *Metals*. 11 (2021) 1–15. <https://doi.org/10.3390/met11020236>.
17. N.O. Korotkova, N.A. Belov, V.N. Timofeev, M.M. Motkov, S.O. Cherkasov, Influence of Heat Treatment on the Structure and Properties of an Al-7% REM Conductive Aluminum Alloy Casted in an Electromagnetic Crystallizer, *Physics of Metals and Metallography*. 121 (2020) 173–179. <https://doi.org/10.1134/S0031918X2002009X>.
18. T. Mukai, M. Kawazoe, K. Higashi, Strain-rate dependence of mechanical properties in AA5056 Al-Mg alloy processed by equal-channel-angular-extrusion, 1998.
19. P. Bazarnik, B. Romelczyk, M. Kulczyk, M. Lewandowska, The strength and ductility of 5483 aluminium alloy processed by various SPD methods, in: *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2013: pp. 423–428. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.765.423>.
20. K. Wawer, M. Lewandowska, K.J. Kurzydowski, Improvement of mechanical properties of 7475 aluminium alloy by the combination of SPD processing and annealing, in: *Materials Science Forum*, Trans Tech Publications Ltd, 2011: pp. 311–314. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.690.311>.
21. H. Ding, Y. Xiao, Z. Bian, Y. Wu, H. Yang, H. Wang, H. Wang, Design, microstructure and thermal stability of a novel heat-resistant Al-Fe-Ni alloy manufactured by selective laser melting, *Journal of Alloys and Compounds*. 885 (2021) 160949. <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2021.160949>.
22. Z. Bian, S. Dai, L. Wu, Z. Chen, M. Wang, D. Chen, H. Wang, Thermal stability of Al-Fe-Ni alloy at high temperatures, *Journal of Materials Research and Technology*. 8 (2019) 2538–2548. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.01.028>.
23. C.H. Liu, J. Chen, Y.X. Lai, D.H. Zhu, Y. Gu, J.H. Chen, Enhancing electrical conductivity and strength in Al alloys by modification of conventional thermo-mechanical process, *Materials and Design*. 87 (2015) 1–5. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2015.07.133>.
24. J.M. Cubero-Sesin, M. Arita, M. Watanabe, Z. Horita, High strength and high electrical conductivity of UFG Al-2%Fe alloy achieved by high-pressure torsion and aging, in: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, Institute of Physics Publishing, 2014. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/63/1/012117>

ИСТОЧНИК ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ, НА БАЗЕ МНОГОФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ И ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ¹

Аннотация: В статье рассматривается структура источника питания электротехнологической установки, включающей индукционный нагрев, содержащего полупроводниковые модули преобразования электроэнергии и многофункциональные трансформаторы. Предложены варианты по совершенствованию параметров качества и эффективности основных узлов источника питания. В частности, предложены трансформаторно-выпрямительные системы с более высоким значением КПД и сниженной величиной коэффициента пульсации.

Ключевые слова: трансформаторно-выпрямительное устройство, источник питания, многофункциональный трансформатор.

I. ВВЕДЕНИЕ

Начиная с 1890г. положено начало развитию электротехнологических установок. С этого же времени сформировалось и направление исследований по их источникам питания. Первые образцы таких источников отличались низким КПД, примитивной системой управления и стабилизации параметров электроэнергии, отсутствием возможности регулирования. Кроме того, первые источники питания лишали электротехнологические установки, включающие индукционный нагрев, ряда функций и ограничивали сферы их применения.

Опираясь на необходимость разогрева лишь поверхностного слоя для целей упрочнения поверхностного слоя и нанесения покрытий, в их конструкцию начали внедряться преобразователи частоты, позволяющие формировать токи и напряжения с частотой, отличной от частоты питающей сети, которые, в свою очередь, наводят в обрабатываемых заготовках токи, вытесняемые к ее поверхности и приводящие к разогреву [1], [2].

Внедрение коммутационных элементов в силовую электрическую цепь неизбежно приводит к появлению переходных процессов и искажению формы графиков функции токов и напряжений как в цепях на выходе

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0838-2020-0006.

коммутационного блока, так и на его входе [3]. Генерация гармоник и субгармоник в питающую сеть приводит к ухудшению качества электроэнергии, что приводит к снижению ресурса потребителей или к выходу их из строя [4].

Помимо электронных модулей в конструкции начали появляться элементы, ответственные за согласование источника питания с питающей сетью и нагрузочным устройством. С задачами подобного рода весьма эффективно решаются применением в конструкции многофункциональных трансформаторов [5], [6]. При этом многофункциональными трансформаторами осуществляется и гальваническая развязка участков электрической сети, что является одним из факторов обеспечения безопасности и сохраняемости энергетического узла при возникновении различного рода отказов и повреждений в электрической цепи электрооборудования, нагрузочном контуре или питающей сети.

II. СТРУКТУРНЫЙ СИНТЕЗ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ ЭЛЕКТРОТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ, ВКЛЮЧАЮЩЕЙ ИНДУКЦИОННЫЙ НАГРЕВ

Синтез энергетической установки целесообразно начинать с определения функций и технических характеристик системы, на основе которых осуществляется построение структурных схем с декомпозицией до уровня схем входящих в систему узлов и элементов.

A. *Структура источника питания*

Задел в области исследования высокочастотных источников питания позволяет формировать их облик с учетом преимуществ и потребностей в тех или иных узлах преобразовательной техники. Наиболее рациональной в части функциональности, практичности и эффективности по мнению автора является структурная схема, представленная на рис. 1.

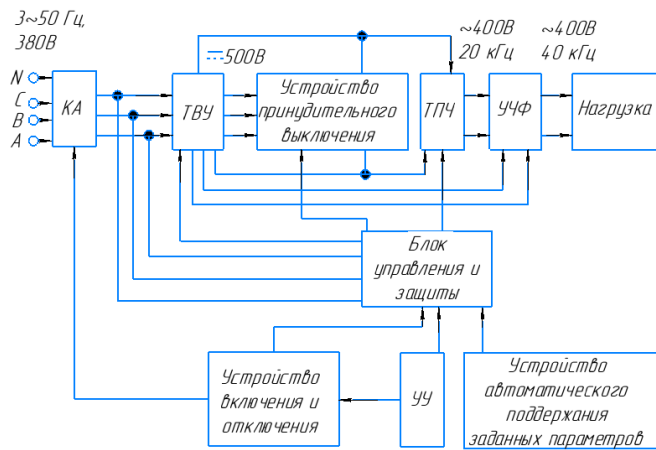


Рис. 1. Структурная схема источника питания электротехнологической установки, включающей индукционный нагрев:

КА – коммутационная аппаратура, ТВУ – трансформаторно-выпрямительное устройство, ТПЧ – тиристорный преобразователь частоты, УЧФ – ферромагнитный умножитель частоты, УУ – устройство управления

Применение данной схемы позволяет:

- Осуществлять согласование источника питания с сетью и нагрузкой за счет применения двух многофункциональных трансформаторов – трансформатора в составе ТВУ и УЧФ, одной из функций которого является преобразование параметров переменного тока;
- Улучшение электромагнитной совместимости преобразователя за счет применения ТВУ с малой величиной пульсаций выпрямленного напряжения;
- Осуществление гальванической развязки электрических цепей;
- Снижение коммутационных потерь и соответствующее повышение КПД системы за счет применения УЧФ;
- Возможность расширения частотного диапазона преобразователя частоты за счет умножения частоты в УЧФ в 2...9 раз в зависимости от модификации;
- Наличие возможности регулирования или стабилизации выходных параметров преобразователя частоты, в том числе и за счет управления током подмагничивания УЧФ.

В. Схемы ТВУ

Трансформаторно-выпрямительное устройство представляет из себя выпрямительный трансформатор, схожий по конструкции с классическим трансформатором напряжения. Главным его отличием является характер нагрузки. У выпрямительного трансформатора нагрузка подключается через блок полупроводниковых выпрямителей, за счет чего носит более «импульсный» характер. Среди проблем, имеющих в этих звеньях, существуют те, которые снижают качество электроэнергии и те, которые влияют на потери энергии и непосредственно на КПД.

Вариантом снижения потерь является применение трансформатора с минимальным потоком рассеяния, конструкция которого представлена на рис. 2. Первая и вторая вторичные обмотки такого трансформатора имеют равенство занимаемых объемов.

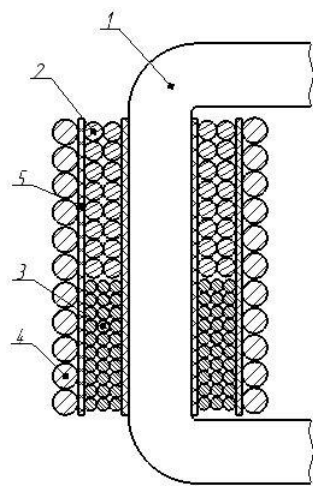


Рис. 2. Выпрямительный трансформатор с минимальным потоком рассеяния [7]
1 – магнитопровод; 2 – первая вторичная обмотка; 3 – вторая вторичная обмотка; 4 – первичная обмотка; 5 – изоляция

Одним из способов снижения амплитуды пульсаций является увеличение пульсности выпрямительного устройства. С этой целью разработаны схемы с 18- и 24- кратной частотой пульсации выпрямленного напряжения, представленные на рис.3 и рис.4. Схема по рис.3 реализована в макете и испытана [8]. Расчетный коэффициент абсолютной величины пульсаций 0,0053.

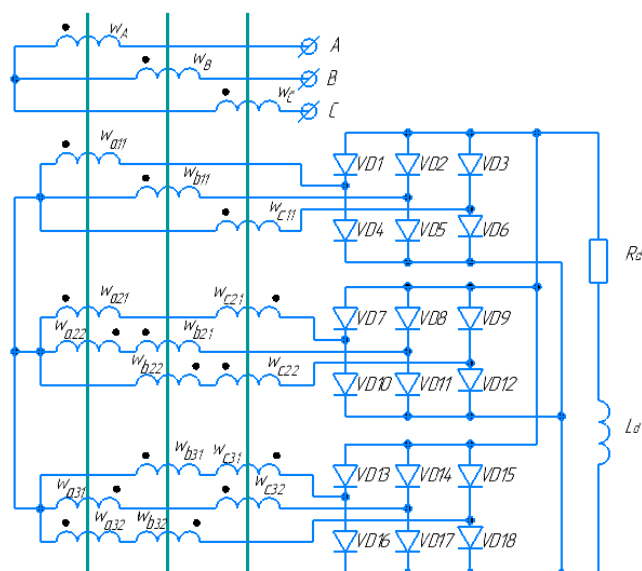


Рис. 3. Преобразователь переменного напряжения в постоянное [9]:
 w_A, w_B, w_C – первичные сетевые обмотки; $w_{a11}, w_{b11}, w_{c11}$ – вторичные обмотки;
 $VD1 \dots VD18$ – диоды; R_d, L_d – активное и активно-индуктивное сопротивление
 в нагрузке

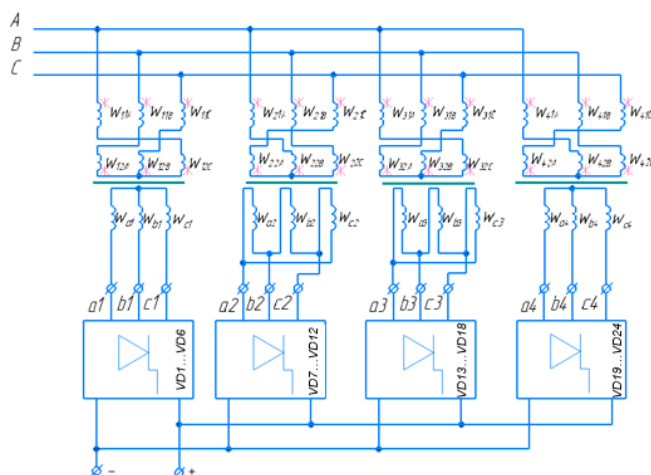


Рис. 4. ТВУ с 24-кратной частотой пульсаций [10]:
 w_{nnX} – первичная обмотка; w_{xn} – вторичная обмотка; VD_{nn} – выпрямительные
 диодные мосты

Также перспективными являются выпрямительные трансформаторы с вращающимся магнитным полем. Их преимуществом является не только возможность получить необходимую пульсность выпрямленного напряжения, но и высокая технологичность изготовления, заключающаяся в унификации со статором электрических машин. Автором также предложен трансформатор с

вращающемся магнитном поле для ТВУ, представленный на рис.5. Расчетный коэффициент абсолютной величины пульсаций составляет 0,05.

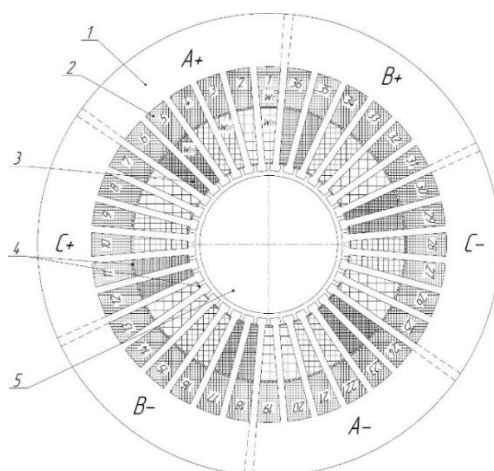


Рис. 5. Трансформатор с вращающимся магнитным полем [11]:
1 – магнитопровод, 2 – первичная обмотка, 3 – вторичная обмотка, 4 – изоляция,
5 – неподвижная опора

К числу предлагаемых конструкций для улучшения энергоэффективности ТВУ относятся и трансформаторы с гибридным магнитопроводом [12]. Магнитная система такого трансформатора представляет собой комбинацию в определенной пропорции различных магнитных материалов.

С. Моделирование

С целью верификации расчетных данных и косвенной проверки работоспособности разработки проведено моделирование трансформатора с гибридным магнитопроводом, состоящим в соотношении 50/50 из аморфного сплава марки 1СР и прецизионного сплава 49К2ФА. Трансформатор имеет три трехфазные концентрические обмотки, на каждом стержне по одной первичной и по две вторичных обмотки. Первичная и одна вторичная обмотка соединены каждая по схеме «звезда», вторая вторичная обмотка по схеме треугольник. Выводы вторичных обмоток соединены на блоки выпрямителей, диоды в которых соединены по схеме Ларионова. Выходные концы блоков подключены параллельно, образуя 12-пульсную систему выпрямления, и соединены с нагрузкой. Результаты моделирования представлены на рис.6.

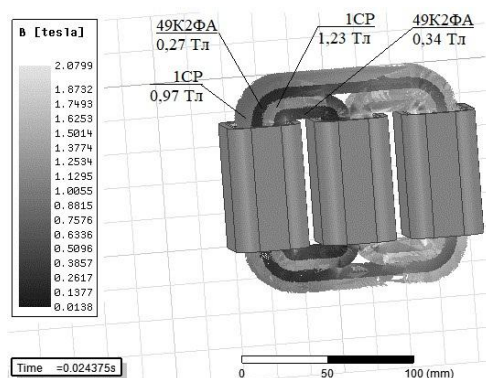


Рис. 6. Выпрямительный трансформатор с гибридным магнитопроводом

Как видно по рис. 6 намагничивание магнитной системы происходит по-разному: аморфный сплав, имея лучшую магнитную проницаемость, насыщается при относительно малых значениях величины напряженности магнитного поля, в то время как магнитное сопротивление прецизионного сплава велико и величина магнитной индукции в нем мала.

Потери холостого хода в выпрямительном трансформаторе без блока выпрямителей при напряжении 115/200 В, 400 Гц составили по результатам моделирования 59,8 Вт.

D. Экспериментальная верификация

Экспериментальные исследования трансформатора в составе ТВУ выполнены на частотах питающей сети 400 и 800 Гц в трех режимах работы: при сниженной нагрузке, при номинальной нагрузке и при 1,5-кратной перегрузке. Результаты измерений приведены в таблице I. Там же выполнен расчет значения КПД ТВУ.

КПД трансформаторно-выпрямительных устройств

	Частота питающего напряжения 400 Гц			Частота питающего напряжения 800 Гц		
	<i>Ток нагрузки 150 А</i>	<i>Ток нагрузки 330 А</i>	<i>Ток нагрузки 450 А</i>	<i>Ток нагрузки 150 А</i>	<i>Ток нагрузки 330 А</i>	<i>Ток нагрузки 450 А</i>
P2, Вт	1360	3945	8250	3615	7524	9855
P1, Вт	1652,1	4532,6	9401,3	3839,6	7989,7	10491,5
КПД на выходе ТВУ	0,82	0,87	0,87	0,94	0,94	0,94

С целью определения потерь холостого хода произведено испытание трансформатора без блока выпрямителей. По результатам замеров получены следующие значения: 20,4 Вт при 108 В и частоте 800 Гц, коэффициент абсолютной величины пульсаций 0,087 и 65,1 Вт при 116,1 В и частоте 400 Гц, коэффициент абсолютной величины пульсаций 0,04. Увеличение потерь преимущественно связано с изменением напряженности магнитного поля, а вместе с тем и сопротивлением в магнитной цепи трансформатора, при изменении напряжения питания, в результате которого еще большая часть магнитного потока начинает протекать по прецизионному магнитному сплаву.

Стоит отметить, что отклонение результатов моделирования по величине потерь холостого хода не превышает 10%.

Таким образом, в электротехнологических установках, включающих индукционный нагрев, важную роль играют их источники питания. От их структуры и параметров зависит не только характер обработки заготовки, но и электромагнитная совместимость электрооборудования предприятия с сетью. В большинстве своем входным узлом источника является трансформаторно-выпрямительное устройство, позволяющее преобразовывать величину напряжения до требуемого уровня и осуществлять выпрямление. Такое преобразование должно происходить по критериям минимизации потерь энергии и величины пульсаций. В виду чего перспективными являются

конструкции ТВУ с 18- и 24-кратной частотой пульсаций выпрямленного напряжения, а среди трансформаторов к их числу относятся преобразователи с гибридным магнитопроводом, с вращающимся магнитным полем, с обмотками, обладающими минимальным потоком рассеяния. При этом конструкции с 18-кратной частотой пульсаций и с гибридным магнитопроводом прошли экспериментальную апробацию, подтвердив свою эффективность.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Яров В.М. Полупроводниковые преобразователи частоты для установок индукционного нагрева: Учебное пособие / В. М. Яров, В. П. Терехов, А. Н. Ильгачев. Чебоксары: издательство Чувашского университета, 2005.
2. Демичев, А. Д. Поверхностная закалка индукционным способом / А. Д. Демичев ; Ред. А. Н. Шамов . – 4-е изд., перераб. и доп. – Л. : Машиностроение, 1979 . – 80 с. – (Б-ка высокочастотника-термиста ; Вып.2) ..
3. Жежеленко, И.В. Показатели качества электрической энергии и их контроль на промышленных предприятиях / И.В. Жежеленко. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 168 с.
4. ГОСТ 32144-2013 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. - М.: Стандартиформ, 2014. - 19 с.
5. Г.П.Задерей, П.Н.Зайка. Многофункциональные трансформаторы в средствах вторичного электропитания. Москва: Радио и Связь, 1989 год.
6. Лавлесс, Дон Л. Обзор полупроводниковых источников питания для индукционного нагрева / пер. Ю.И. Болтовский, Г.И. Таназлы // Силовая электроника. – 2007. – № 4. – С. 73–76.
7. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Меднов А.А. Обмотка трансформатора Патент на полезную модель №194636 U1 H01F 30/04 (2006.01) H01F 5/04 (2006.01). заявл.: 14.01.2019г. опубл.: 18.12.2019г.
8. Вавилов, В.Е. Исследование 18-пульсного трансформаторно-выпрямительного устройства с магнитопроводом из аморфной стали / В.Е. Вавилов, Д.В. Гусаков, И.И. Ямалов, Д.Р. Фаррахов, А.А. Меднов, А.Х. Минияров // Электротехника. 2020. № 2. С. 31-34.
9. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Меднов А.А. Преобразователь переменного напряжения в постоянное (варианты) Патент на изобретение №2661890 C1 H02M 7/08 (2006.01). заявл.:24.04.2017г. опубл.: 20.07.2018г.
10. Рогинская Л.Э., Горбунов А.С., Меднов А.А. Многопульсное выпрямительное устройство Патент на полезную модель №184790 U1 H02M 1/14 (2006.01) G05F 1/30 (2006.01) H02M 7/162 (2006.01) H02M 7/17 (2006.01). заявл.:13.06.2018г. опубл.: 09.11.2018г.
11. Каримов, Р.Д. Моделирование магнитной системы трансформатора с вращающимся магнитным полем / Р.Д. Каримов, А.А. Меднов // Новые импульсы развития: вопросы научных исследований. Сборник статей VI Международной научно-практической конференции в 2-х частях. Саратов, 2020. С. 96-100.
12. Исмагилов Ф.Р., Хайруллин И.Х., Вавилов В.Е., Гусаков Д.В., Минияров А.Х., Меднов А.А. Магнитопровод трансформатора (варианты) Патент на изобретение №2656861 C1 от 07.06.2018г.

*Ямалов И. И., Шарафутдинов Ш. Н., Мустафин Д. Д., Ильясов Д. Р.,
Баскакова А. В., Подгузов А. А.*
ФГБОУ ВО «УУНиТ»

АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ¹

Аннотация: Статья посвящена разработке и исследованию адаптивной системы автоматического управления стабилизацией радиальных отклонений ротора электрической машины с активными магнитными подшипниками. Предлагается новый подход к решению проблемы стабилизации вращающейся части электрической машины, основанный на активной текущей стабилизации его пространственного положения. Алгоритмы управления АМП представляют собой комплекс программных и аппаратных средств обеспечения постоянства магнитных подшипников. Приводятся описание способа конструктивной реализации подхода, методика структурного синтеза закона управления, а также математическое моделирование моделей проведенного исследования. Практическое внедрение разработанной системы поспособствует увеличению параметрической надежности электрического оборудования различного назначения.

Ключевые слова: магнитный подвес, система управления АМП, САУ.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие современного электрооборудования неразрывно связано с повышением требований в части устранения любых возникающих механических колебаний, которые являются причиной недопустимой работы по снижению их точности. Особенно остро стоит проблема с прецизионным оборудованием, в состав которых входят электрические двигатели постоянного или переменного тока. Основным источником возникающих механических колебаний в электроустановках является вращающийся ротор применяемой электрической машины. Рост скоростей вращения и мощностей роторных машин при одновременной тенденции к уменьшению массовых габаритных показателей выдвигает проблему повышения долговечности подшипниковых узлов. В ряде областей современной техники требуются подшипники, способные надежно работать в абсолютно любых, в том числе и экстремальных условиях (агрессивной среде, вакууме и т. д.).

Традиционные подшипники качения и скольжения к настоящему времени достигли высокого технологического уровня, однако природа протекающих в

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

них процессов ограничена и принципиально невозможно преодолеть барьеры, локализованные их физическими свойствами. Именно этот недостаток технологического процесса призван решить активный магнитный подшипник, благодаря отсутствию механического контакта между подвижными и неподвижными частями подшипников. Работа АМП основана на известном принципе активного магнитного подвеса ферромагнитного тела, т. е. его стабилизация в заданном положении осуществляется силой магнитного притяжения, действующего на него со стороны управляемых электромагнитов.

Разработки принципиально новых видов опор, в которых для создания соответствующих реакций используются магнитные и электрические поля, позволяют улучшить эксплуатационные возможности и сократить количество брака. Одними из таких подвесов являются активные магнитные подшипники (АПМ), которые применяются для бесконтактного удержания и центрирования роторов электрических машин при их эксплуатации. По принципу действия АПМ являются системой автоматического управления с главной обратной связью по положению и представляют собой комплект электромагнитов и блоков датчиков положения ротора, устанавливаемых непосредственно на валу машины, а также системой управления, обеспечивающей устойчивость радиального положения оси вращения.

Отсутствие в АМП механического контакта и необходимости смазочных материалов ввиду специальных свойств магнитов делает их весьма перспективной областью исследования и разработки для дальнейшего внедрения и эксплуатации в технологические процессы. В орбите областей, в которых могут применяться АМП, находятся турбинные и газотурбинные техники, машиностроение и приборостроение, насосные станции, криогенная техника, исследования космоса и ядерная промышленность, измерительные приборы, фрезерные шлифовальные станки и многое другое, без чего невозможно представить жизнь современного человека. Алгоритмы, по которым проектируются и работают активные магнитные подшипники являются составной, и одной из самых важных частей регулирования и

стабилизации электромагнитной машины, регулятивно влияя на состояние и отказоустойчивость активного магнитного подвеса. Повышение эксплуатационных характеристик высокоточных электроустройств путем применения новых способов синтеза систем является первоочередным требованием к развитию отрасли АМП, особенно в случае его использования для стабилизации лазерных приборов, станков, систем ориентации и космических аппаратов.

II. АЛГОРИТМЫ УПРАВЛЕНИЯ АКТИВНЫМ МАГНИТНЫМ ПОДВЕСОМ

Теория управления дает большое число критериев и методов оптимизации. Одним из эффективных оптимальных методов управления является линейно-квадратическое, или ЛК-управление (линейный закон управления при квадратическом функционале качества).

Пусть дана линейная система управления

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

где x – n -мерный вектор состояния;

y – выходная переменная;

u – m -мерный вектор управляющей переменной;

A, B, C – постоянные матрицы.

Требуется найти управление $u = 0$, которое переводит систему (1) из произвольного начального состояния в нулевое состояние при минимальном значении интегрального квадратического функционала

$$\int_0^{\infty} [y^T(t)y(t) + \rho u^T(t)u(t)] dt \quad (2)$$

В свою очередь оптимальный закон уравнения стабилизации активного магнитного подвеса имеет вид:

$$u^0 = -Gx; G = \rho^{-1}B^T P \quad (3)$$

где G – $m \times n$ матрица коэффициентов усиления обратной связи;

P – $n \times n$ симметрическая матрица, являющаяся единственным положительно определенным решением алгебраического матричного уравнения Риккати.

Основная трудность метода заключается в необходимости решения уравнения Риккати, состоящего из $n \left(\frac{n+1}{2}\right)$ нелинейных алгебраических уравнений. Примеров систем, для которых существует аналитическое решение уравнения Риккати очень мало.

Следовательно, замкнутое решение задачи ЛК-управления. Одна из систем – это одноступенный активный магнитный подвес. Другая система — это полный магнитный подвес гироскопического ротора с пятью степенями свободы.

В первом случае (с одноступенным подвесом) система управления описывается все известной формулой

$$m\ddot{y} - Cy = h_i \quad (4)$$

где y – управляемая координата;

m – масса подвешиваемого тела;

i – управляющий ток;

c – «отрицательная» позиционная жесткость;

h – токовая жесткость, или регулировочный коэффициент.

Заметим, что поскольку из двух полюсов объекта управления $s_1 = k; s_2 = -k$, (где $k = \sqrt{C/m}$) один полюс вещественный положительный, разомкнутая система управления (4) неустойчива. Применение к системе (4) процедуры ЛК-оптимизации (1)-(3) приводит к пропорционально-дифференциальному (ПД) закону управления вида:

$$i^0 = -(g_1 y + g_2 \dot{y}) \quad (5)$$

где:

$$g^1 = mk^2 [1 + (1 + 1)_1 / pk^4, 0,5] / n \quad (6)$$

Коэффициенты усиления обратной связи. Целесообразнее будет заменить величину p на более понятный инженеру АМП величину, к примеру прибегнув

к полиному оптимальной замкнутой системы. Закон управления, определяемый соотношениями (5) и (6), содержит варьируемый параметр ω_0 , имеющий ясный физический смысл. Требуемые динамические свойства подвеса можно обеспечить соответствующим выбором значения ω . Заметим, что самый экономичный режим соответствует предельному случаю $\omega \rightarrow \infty$

Ротор, как твердое тело, имеет пять степеней свободы, поэтому его подвес является многостепенной электромеханической системой. В свою очередь ранее мы описали лишь одноступенчатый подвес, который регулируется лишь единственной координатой y , но существуют и другие системы регулирования стабилизации, к примеру, двухступенчатый. Именно такие системы описываются уравнением Лагранжа-Максвелла

Для описания механического движения должны быть введены координаты q , с порядковым числом равным числу свободных степеней механической системы. Составляя уравнение для кинетической и потенциальной энергии системы:

$$T = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}(q_1 \dots q_n); \Pi = \Pi(q_1 \dots q_n) \quad (7)$$

Включая обобщенные коэффициенты инерции.

Составим выражение для магнитной энергии (пренебрегая насыщением и гистерезисом)

$$w = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^m \sum_{s=1}^m L_{ks}(q_1 \dots q_n) i_k i_s \quad (8)$$

Индуктивность контуров, описанная в уравнении, при одинаковых параметрах k и s , называют явлением самоиндуктивности.

При отсутствии в электрических цепях конденсаторов уравнения Лагранжа-Максвелла имеет вид:

$$\left\{ \begin{array}{l} d \frac{1}{\partial \dot{a}_1} \frac{\partial T}{\partial \dot{q}_j} + \frac{\partial T}{\partial q_j} + \frac{\partial \Pi}{\partial q_j} = R_j + Q_j; R_j = \frac{\partial w}{\partial q} \\ \frac{dw}{\partial j_k} + r_{k^i k=u_k; j=1 \dots n; k=1 \dots m} \end{array} \right. \quad (9)$$

где R – обобщенные магнитные реакции подшипников;

Q – не потенциальные обобщенные силы.

Эта система содержит в себе n уравнений второго порядка относительно токов I . Из уравнения (9) также можно вывести следующие ей электромеханические аналогии.

Токи имеют смысл обобщенных скоростей. А магнитную коэнергию можно формально отнести к кинетической энергии. Напряжения u играют роль обобщенных сил, что по сути является сторонней ЭДС в k -том контуре.

III. УПРАВЛЕНИЕ ПО ТОКУ И НАПРЯЖЕНИЮ

Неконтактный магнитный подвес ротора имеет 5 каналов управления – 4 радиальных и 1 осевой. Каждый канал управляется автономно (т. е. по сигналу) от своего датчика. В свою очередь одно степенный подвес двустороннего действия неустойчив, и чтобы придать ему желаемые динамические качества в каналы управления вводится регулятор, на ее вход подается сигнал с датчика положения, а на выходе – ток или напряжение в электромагнит

Рассматривая задачи учета ограниченности ресурса напряжения на теоретическом графике, представленном на рис. 1, необходимо найти линию ОР на графике фазовых траекторий. Для отыскания этой линии нам необходимо заранее задать условие, что момент, соответствующий концу промежутка, совпал с моментом пересечения линии OL фазовой траекторией CD в точке D.

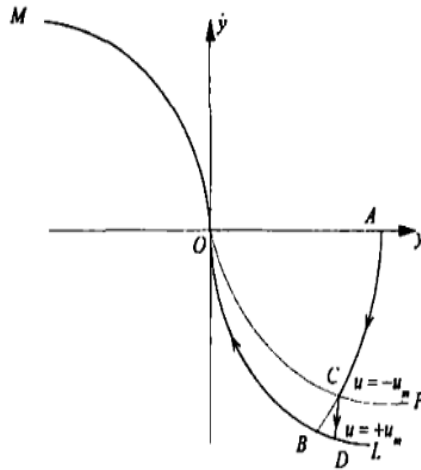


Рис. 1. Линия переключения напряжения (OP)

где ML - начальная линия переключения тока;

AB - фазовая траектория, где в точке B ток мгновенно попадает в полярность и образует линию переключения тока MOL.

Даже при нахождении единственно точного решения задачи, оно не будет иметь практической ценности в силу неустойчивости объекта. Малейшая ошибка в измерении перемещения скорости, при которой переключение напряжения произойдет раньше, чем будет достигнута линия OP, приведет к потере устойчивости подвеса. Это иллюстрируется на рис. 2.

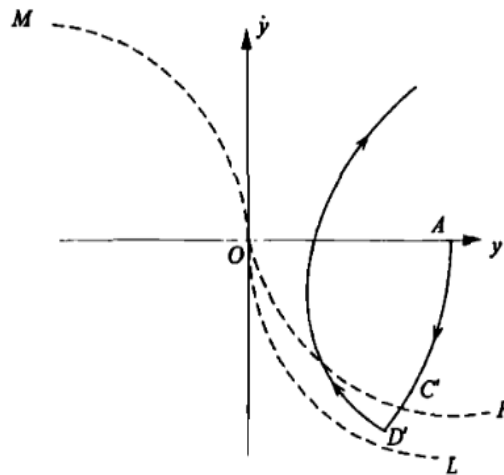


Рис. 2. Потеря устойчивости подвеса вследствие раннего переключения напряжения

где C' – точка переключения напряжения; D' – точка достижения током значения $i = +1$.

Дабы избежать такой ситуации, необходимо создать запас константности. Для этого могут применяться различные средства, количественно позволяющие расширить алгоритм АМП в сторону увеличения ресурса устойчивости системы, так как на практике изменения и скачки напряжения имеют место быть.

Схема способа активной стабилизации радиальных отклонений представлена на рис. 3. Применение этой методики активной стабилизации радиальных отклонений позволяет стабилизировать ротор электрической машины, введя в контуры регулирования звенья с требуемыми коэффициентами демпфирования и жесткости. Положение ротора в зазоре между частями АМП оценивается датчиками положения. Датчики вырабатывают сигналы в зависимости от отклонения ротора от центрального положения. Автоматическая система управления, оперируя сигналами датчиков, отправляет задающие воздействия на соответствующие объекты управления (ОУ) и при протекании токов в обмотках электромагнитов возникают силы магнитного взаимодействия, которые препятствуют отклонению ротора машины

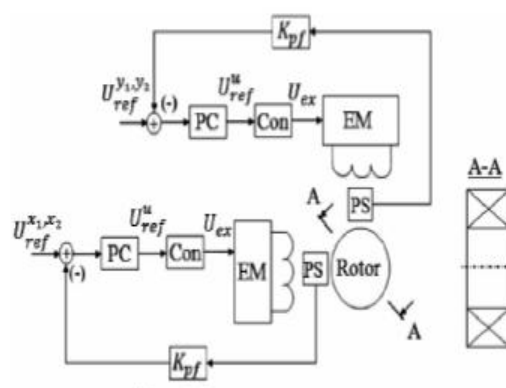


Рис. 3. Схема активной стабилизации ротора

Существует 2 способа регулирования стабилизации магнитного подвеса:

- 1) По току

2) По напряжению

Исходные модели управления магнитным подвесом описываются уравнениями, а ее линеаризованная модель-аналог – уравнениями. Так как магнитная сила не зависит от суммарного тока на выходах, мы можем пренебречь оным в пользу выполнения тождества $U_v(t) = 0$. Поскольку решение уравнения $LI_v + rI_v = 0$ с течением времени стремится к нулю, справедливо выражение:

$$u_1 v = -u_{2v} = u; \quad (10) \quad i_1 v = -i_{2v} = i \quad (10.1)$$

Эти соотношения (10) (10.1) – дифференциальная схема управлениями электромагнитами в подвесе двухстороннего действия. Подвес имеет два управляющих входа и один выход, регулирующийся либо током, либо напряжением.

В первом случае линейная модель управления стабилизацией магнитного подвеса описывается формулой:

$$m\ddot{y} - c_y y = h_i i + Q(t) \quad (11)$$

Приводя исходную систему к нормализованному виду, мы имеем

$$x = (y; \dot{y}); y = i; + (t) = Q_{(t)}; C = D = 1:0 \quad (12)$$

$$A = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ c_y/m & 0 \end{pmatrix} \quad B = \begin{pmatrix} 0 \\ 2/h_i \end{pmatrix} \quad B_f = \begin{pmatrix} 0 \\ 1/m \end{pmatrix}$$

Также в безмерных переменных уравнениях могут быть две формы записи:

а) если используется прямая размерность времени;

б) если используется безразмерная величина времени.

При управлении стабилизацией по напряжению используется та же линейная модель подвеса и исходное уравнение, при использовании которого

можно выразить линейную модель подвеса в виде дифференциальной системы третьего порядка, описанной выше.

«Отрицательная» позиционная и токовая жесткости подвеса соответственно равны:

$$C_y = 2Li_c^2 / \delta^2; h_i = 2h_1i = 2liE / \delta \quad (13)$$

где функцию управления выполняет напряжение.

В ряде задач более удобно использовать безразмерную форму записи уравнений, введением безразмерных переменных (описанной выше) и характерного безразмерного параметра подвеса

$$\chi = T_0 \sqrt{\frac{C_y}{m}} = \sqrt{\frac{2li^2T_0^2}{mb^2}} \quad (14)$$

IV. АДАПТИВНОЕ УПРАВЛЕНИЕ

В задачах, решаемых выше было предположено, что параметры неизменны с течением времени. На практике же параметры могут иметь предельно допустимые или недопустимые отклонения, вследствие различных внутренних и внешних факторов, влияющих на состояние стабильности АМП, к примеру газодинамические силы в трубопроводах или компрессорах или отрицательная жесткость электродвигателя при использовании АМП в оном. В любом случае любое субъективное отклонение становится серьезной проблемой при пуско-наладочных работах. Эта сложность в стабилизации магнитных подшипников решается с помощью адаптивного управления, способном обеспечить постоянство динамических качеств подвеса в широком диапазоне его жизненных параметров.

Относительно реализации данного алгоритма управления, можем явно показать, что ему отвечает следующая система:

$$\tau(i)^* + i = i^0 \quad (15)$$

где τ – постоянная времени, которая равна:

$$\tau = [\rho_1(\partial f)\partial t^1]^{-1} \quad (16)$$

Следует указать еще одну причину актуальности адаптивного управления. Дело в том, что каждый неадаптивный регулятор

после своего изготовления должен быть настроен.

Эта настройка осуществляется методом проб и ошибок и требует больших трудозатрат персонала высокой квалификации. Поэтому весьма желательно построить такой регулятор, который вовсе бы не нуждался в настройке после изготовления и мог бы использоваться для различных подшипников без перенастройки. Единственным параметром, который должен характеризовать такой регулятор, могла бы служить собственная частота подвеса. Таким образом, во всех перечисленных случаях возникает задача управления при существенно неполной информации об объекте управления, т. е. задача адаптивного управления.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Цель любого алгоритма системы активного магнитного подвеса – регулировать отклонение магнитного подшипника от его положения равновесия при наличии внешних помех и неопределенности системы. В направлении разработки алгоритмов управления стабилизацией активного магнитного подвеса проделана большая работа, включающая в себя различные линейные и/или нелинейные математические уравнения, позволяющие однозначно и качественно произвести расчет стабилизации ротора, наладить механические и кинетические движения магнитных подшипников. Можем также наметить следующие два направления дальнейшего развития проблемы. Первое направление заключается в расширении перечня систем управления АМП, для которых существует аналитическое решение задачи ЛК-управления. К таким системам можем отнести односторонний магнитный подвес. Второе направление связано с установлением условий, при выполнении которых

рационально (или нерационально) использовать более простое раздельное управление.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ю. Н. Журавлев. Активные магнитные подшипники, расчет и применение, Изд.: Политехника 2003 г., 64–89 с., ISBN: 5-7325-0665-1
2. Д. Л. Ким. Теория автоматического управления. Т. 2. Многомерные, нелинейные, оптимальные и адаптивные системы. М.: ФИЗМАТЛИТ, 2004. 158–169 с., ISBN 978-5-9221-0857-7J Веб-ресурс: <https://goo.su/6GcZo8>
3. М. В. Поляков. Определение зоны допустимых перемещений ротора электродвигателя-маховика с активным магнитным подвесом / Вестник СибГАУ. 2016. Т. 17, №4. С. 1005–1014.
4. Yuanping X., Long D., Jin Z., Chaowu J., Qintao G., Active Magnetic Bearings Stiffness and Damping Identification from Frequency Characteristics of Control System ISA Transactions, 2016, vol. 61, March, pp. 7-8. PMID: 26803551. [Online]. Available: <https://downloads.hindawi.com/journals/sv/2016/1067506.pdf>
5. О. Б. Буль. Методы расчета магнитных систем электрических аппаратов: Магнитные цепи, поля и программа FEMM: учебное пособие для студентов высших учебных заведений, М.: Издательский центр «Академия», 2005. – 184 с., ISBN 5-7695-2064-7

УЧЕТ ВЗАИМНОГО ВЛИЯНИЯ МАГНИТНОГО И ГИДРОДИНАМИЧЕСКОГО ПОЛЕЙ В УСТРОЙСТВАХ МАГНИТОЖИДКОСТНОЙ ГЕРМЕТИЗАЦИИ¹

Аннотация. Целью работы является разработка численной модели взаимовлияющих магнитного и гидродинамического полей магнитожидкостного герметизатора. Поставленная цель достигается за счет выбора необходимых уравнений, граничных условий, допущений и физических свойств магнитной жидкости при построении численной модели рабочего зазора герметизатора. Проведено сравнение двух подходов к расчету гидродинамического поля герметизатора. В первом подходе зазор принимается полностью заполненным магнитной жидкостью, во втором – учитывается деформация границы магнитожидкостной пробки под вершиной зубца. Критический перепад давления определяется на основе распределения давления внутри магнитной жидкости. Приведены результаты оценки влияния центробежных усилий, возникающих при вращении вала, на удерживаемый герметизатором перепад давления. Показано, что при диаметре вала до 65 мм и частоте вращения до 3000 об/мин изменение удерживаемого перепада давления, связанное с центробежными эффектами, незначительно и не превышает 2 % от значений при неподвижном вале. Проведено сравнение с данными, полученными по аналитическим формулам. Значимость результатов состоит в возможности использования разработанной численной модели при исследовании взаимосвязанных физических процессов в рабочем зазоре магнитожидкостного герметизатора вращающихся валов.

Ключевые слова: магнитная жидкость, магнитожидкостный герметизатор, численное моделирование.

1. ВВЕДЕНИЕ

Магнитожидкостная герметизация вращающихся валов, резьбовых и разборных соединений – это получившая наибольшее распространение сфера применения магнитных жидкостей. Магнитные жидкости (МЖ) представляют собой устойчивый в магнитном и гравитационном полях коллоидный раствор наноразмерных частиц магнетита покрытых, для стабилизации и предотвращения слипания, поверхностно активным веществом, в жидкости носителе. Удержание МЖ с помощью приложенного внешнего градиентного магнитного поля в зазоре между вращающимся и неподвижным элементами позволяет разделить наружный и внутренний объемы электрических машин, аппаратов, вакуумных либо особо чистых камер и т.п. и обеспечить передачу вращательного движения с нулевой утечкой, с

¹«Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 22-79-00156, <https://rscf.ru/project/22-79-00156/> »).

минимальным трением, уровнем загрязнения и отсутствием необходимости в частом обслуживании [1].

Трудность математического анализа физических процессов, протекающих в зазоре магнитожидкостного герметизатора (МЖГ), связана как с неньютоновским поведением МЖ, вязкость которой зависит не только от температуры и градиента скорости, но также и от величины магнитного поля, так и с обратным влиянием положения магнитной жидкости в пространстве на магнитную проводимость всего устройства [2]-[5].

Расширение возможностей применения численных методов при расчете магнитожидкостных устройств, позволяющих визуализировать и анализировать различные параметры течения является сложной и актуальной научной задачей.

II. МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Разработанная двумерная осесимметричная модель рабочего зазора МЖГ показана на рис. 1 и состоит из стального вращающегося вала, заполненного МЖ зазора и неподвижного стального зубца, выступающего в роли концентратора магнитного поля.

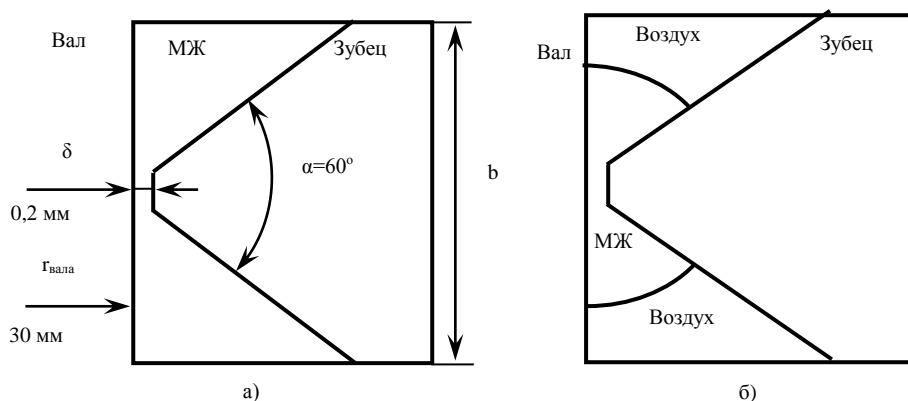


Рис. 1. Зубцовое деление МЖГ:

a – зазор полностью заполнен МЖ, *б* – в зазоре находится МЖ пробка

Расчет максимального удерживаемого герметизатором перепада давления проведен двумя разными подходами к созданию модели. В первом случае

(рис.1,а) принято допущение о полном заполнении магнитной жидкостью зазора между зубцом и валом. Во втором подходе (рис. 1,б) в зазоре присутствует магнитожидкостная пробка, разделяющая области с высоким и низким давлением. В обоих подходах течение МЖ происходит при вращении поверхности вала с заданной угловой частотой. Второй подход дополнительно учитывает деформацию границы магнитожидкостной пробки под действием приложенного стороннего давления.

Гидродинамический расчет основан на уравнении Навье-Стокса с допущением о том, что вязкость МЖ и воздуха не зависит от температуры.

Учет влияния магнитного поля на гидродинамические процессы осуществлен через дополнительную объемную силу, действующую на каждый элементарный объем МЖ и задаваемую уравнением

$$\bar{F} = \mu_0 M \nabla \bar{H},$$

где M – намагниченность МЖ; H – напряженность магнитного поля, μ_0 – магнитная проницаемость вакуума. Сила тяжести на два порядка меньше магнитной силы и в расчете не учитывается.

Граничные условия гидродинамического поля для обоих подходов показаны на рис. 2. Задано отсутствие проскальзывания жидкости на стенках вала и зубца, значение тангенсальной составляющей скорости на поверхности вала и нулевая скорость на поверхности зубца.

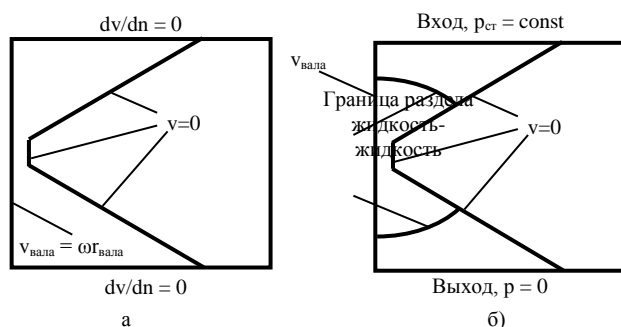


Рис. 2. Граничные условия гидродинамической задачи: а – зазор полностью заполнен МЖ, б – в зазоре находится МЖ пробка

Для деформации магнитожидкостной пробки под действием центробежной, магнитной сил и приложенного стороннего давления положение и форма границ раздела между МЖ и воздухом реализуется с помощью граничного условия для двух несмешивающихся жидкостей, задаваемого уравнениями

$$v_1 = v_2 ,$$

$$n_i \cdot \tau_2 = n_i \cdot \tau_1 + f_{st} ,$$

$$v_{mesh} \cdot n_i = v_1 \cdot n_i ,$$

где v_1 и v_2 – скорости МЖ и воздуха соответственно, v_{mesh} – скорость движения сетки на границе раздела, n_i – нормаль к границе раздела (направлена наружу от области с МЖ), τ_1 и τ_2 – тензоры полного напряжения в МЖ и воздухе, f_{st} - сила поверхностного натяжения на единицу площади. Поток массы через границу раздела отсутствует.

Решение задачи магнитостатики проведено согласно уравнениям

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J}, \bar{B} = \nabla \times \bar{A}, \bar{B} = \mu \bar{H},$$

где A – векторный магнитный потенциал, B – вектор магнитной индукции, μ – магнитная проницаемость материала.

Магнитные свойства стали заданы кривой намагничивания, соответствующей кривой намагничивания Ст3, в качестве допущения относительная магнитная проницаемость МЖ принята постоянной и равной 1,2, у воздуха равной единице.

Граничные условия для расчета магнитного поля показаны на рис. 3 и задаются через векторный магнитный потенциал. Величина векторного магнитного потенциала меняется прямо пропорционально радиусу вала

$$A_2 = \frac{r_{\text{вала}} B_{\text{ср}} b}{r} ,$$

где $r_{\text{вала}}$ – радиус вала, b – ширина зубца, $B_{\text{ср}}$ – средняя индукция в зазоре.

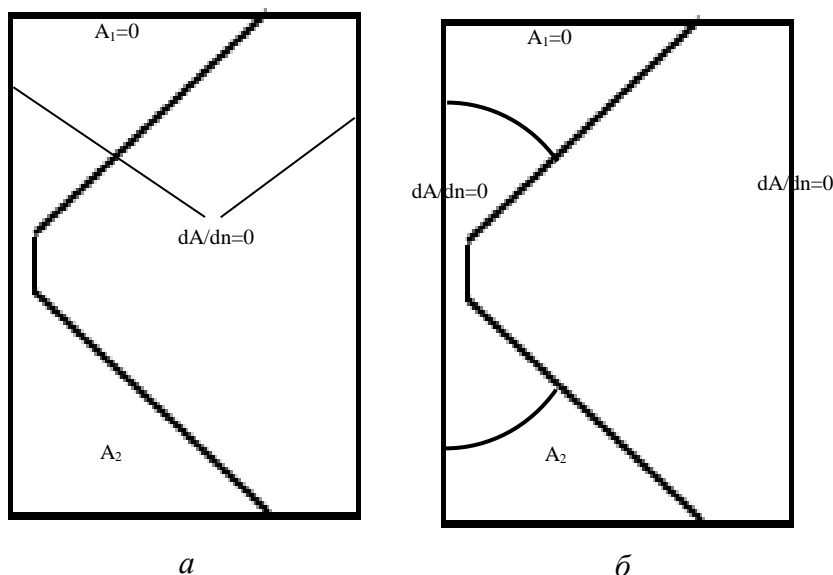


Рис. 3. Граничные условия при расчете магнитного поля:
а – зазор полностью заполнен МЖ, *б* – в зазоре находится МЖ пробка

Для перемещения точек контакта МЖ со стальными элементами задана возможность скольжения границ раздела МЖ и воздуха по поверхностям вала и зубца с одновременной деформацией расчетной сетки. Если во время расчета качество элементов сетки в результате деформации становится неудовлетворительным, то происходит ее автоматическое перестроение во всей модели с учетом нового расположения границ [6].

В результате совместного расчета гидродинамического и магнитного полей можно получить распределение в рабочем зазоре МЖГ азимутальной составляющей скорости и давления внутри МЖ. Распределение давления подчиняется уравнению Бернулли

$$\rho \frac{v^2}{2} + p - \mu_0 \int_0^H M dH = \text{const}$$

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 4 приведено распределение магнитного поля в зазоре герметизатора с нанесенными линиями равной индукции. В модели с полным заполнением зазора МЖ (рис. 4,а) магнитное поле распределено более равномерно. Так как относительная магнитная проницаемость МЖ принята

равной 1,2 при наличии магнитожидкостной пробки (рис. 4,б) поле более локально концентрируется в области нахождения МЖ что соответствует реальности и даст больший критический перепад давления, зависящий от разности максимальной и минимальной индукции в области нахождения МЖ.

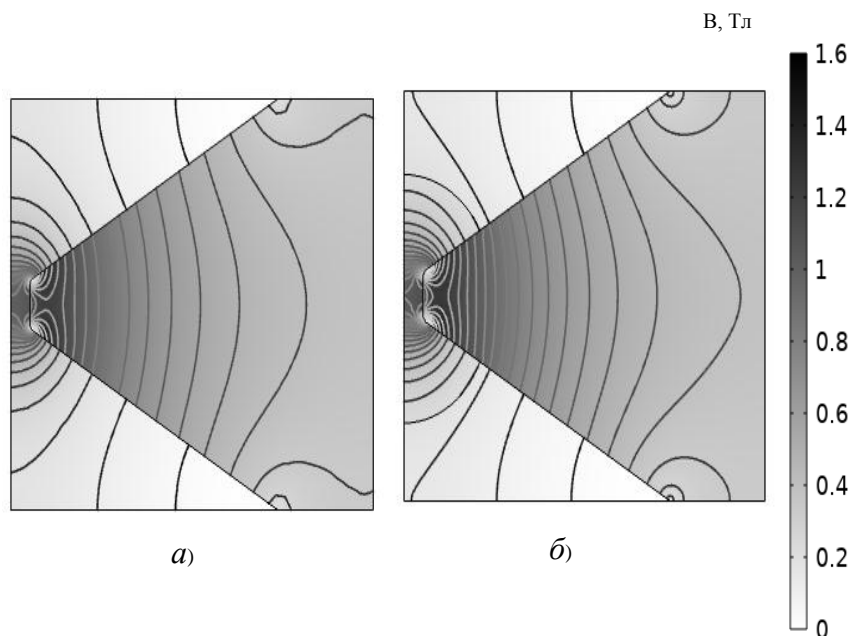


Рис. 4. Распределение магнитного поля в МЖГ с нанесенными линиями равной индукции:
а – зазор полностью заполнен МЖ, *б* – в зазоре находится МЖ пробка

Распределение давления при неподвижном вале вместе с нанесенными линиями равного давления показано на рис. 5. Так как действие силы тяжести при расчете не учитывается, то давление в МЖ в данном режиме создается только дополнительной объемной магнитной силой. Для обоих подходов распределение линий равного давления качественно повторяет распределение линий равной индукции. Для случая с магнитожидкостной пробкой ее произвольно заданные границы деформируются и выстраиваются по линии равного давления. Избыточное давление в воздухе отсутствует, так как никаких объемных сил на него не действует.

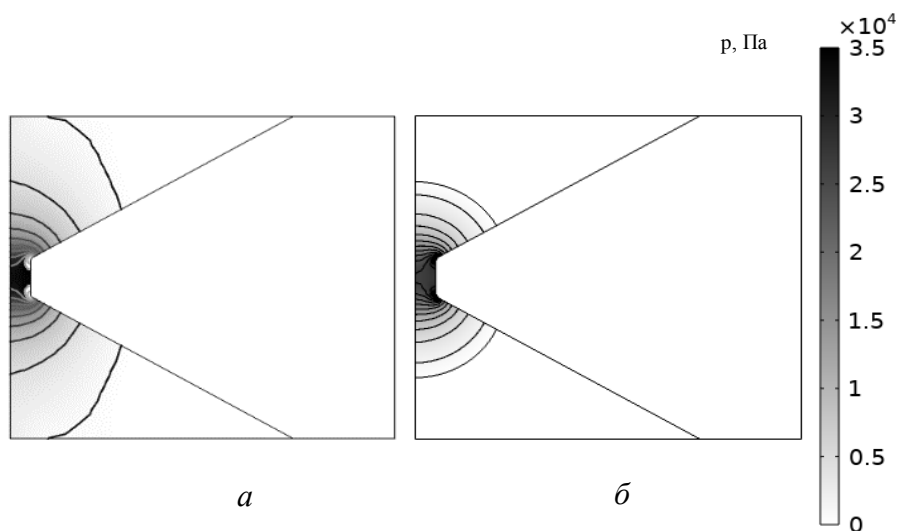


Рис. 5. Распределение давления в МЖГ с нанесенными линиями
равного давления:
a – зазор полностью заполнен МЖ, *б* – в зазоре находится МЖ пробка

При увеличении частоты вращения вала на МЖ начинает действовать дополнительная центробежная сила, стремящаяся оторвать элементарные объемы жидкости от поверхности вала. Распределение давления и форма поверхности магнитной жидкости изменяются, как показано на рис. 6 для частоты вращения вала 6000 об/мин. Критический перепад давления определяется по линии равного давления максимальной величины, связывающей зубец и вал [7].

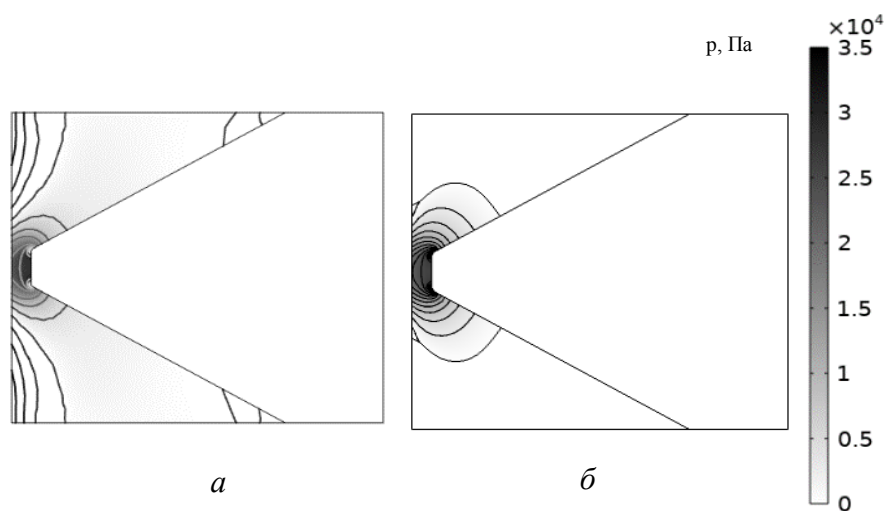


Рис. 6. Распределение давления в МЖГ с нанесенными линиями
равного давления:
a – зазор полностью заполнен МЖ, *б* – в зазоре находится МЖ пробка

Изменение границы магнитожидкостной пробки с ростом частоты вращения вала и приложенного стороннего перепада давления показано на рис.7. Граница магнитной жидкости соответствует такому положению магнитожидкостной пробки, при котором объемная магнитная сила уравнивает центробежную силу и приложенное давление. Увеличение частоты вращения (рис. 7,б) ведет к уменьшению линии контакта МЖ с валом. Рост приложенного стороннего давления с одной из сторон (рис. 7,в) ведет к смещению границы МЖ пробки с этой стороны к вершине зубца в область больших индукций магнитного поля. Совокупное действие центробежной и сторонней сил комплексно деформирует поверхность МЖ пробки, приводя как к смещению границы, так и к отрыву ее от поверхности вала (рис. 7,г).

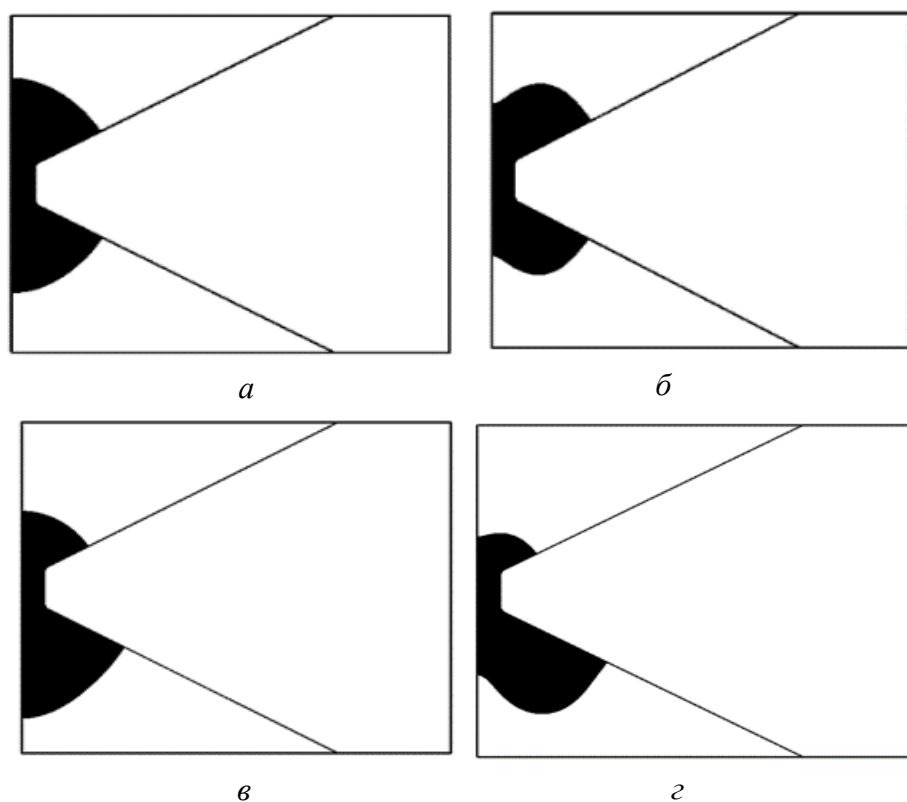


Рис. 7. Изменение границы магнитожидкостной пробки:
а – $n=0$ об/мин, $p=0$ кПа; *б* – $n=9000$ об/мин, $p=0$ кПа;
в – $n=0$ об/мин, $p=5$ кПа; *г* – $n=9000$ об/мин, $p=5$ кПа.

На рис. 8 представлено полученное с использованием разных подходов изменение критического давления МЖГ с ростом частоты вращения вала, полученное. Линия 1 рассчитана с использованием аналитической формулы [8]

$$\Delta p = M_s (B_{\max} - B_{\min}) - \frac{2\rho v_{\text{вала}}^2 \delta}{D_{\text{вала}}}$$

где M_s – намагниченность насыщения МЖ, B_{\max} и B_{\min} – максимальное и минимальное значение магнитной индукции в области нахождения МЖ при неподвижном вале, $D_{\text{вала}}$ – диаметр вала, $v_{\text{вала}}$ – линейная скорость поверхности вала, ρ – плотность МЖ, δ – величина зазора под вершиной зубца. Первое слагаемое данного уравнения равно критическому давлению при неподвижном вале, второе слагаемое – уменьшение удерживаемого перепада давления под действием центробежных сил.

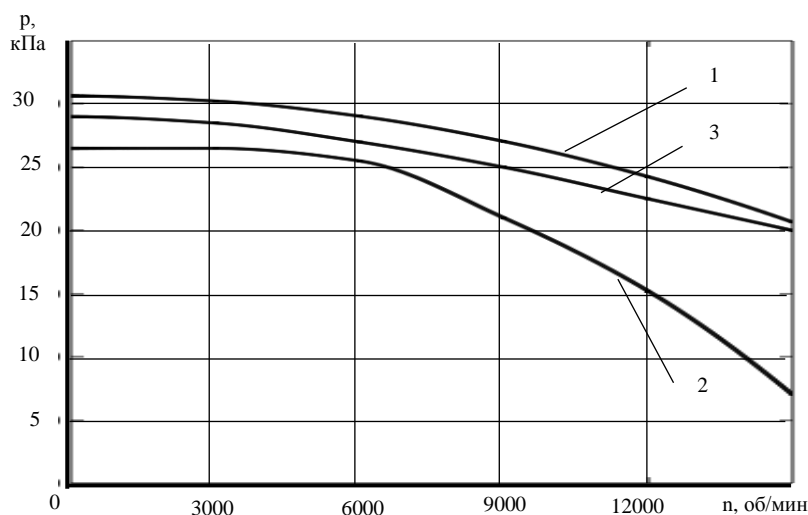


Рис. 8. Зависимость максимального удерживаемого перепада давления:
 1 – аналитическое решение; 2 – зазор полностью заполнен МЖ;
 3 – магнитожидкостная пробка с учётом её деформации

Линия 2 построена на основе линий равного давления в МЖ, полученных в результате численного расчета с допущением о полном заполнении рабочего зазора жидкостью.

Линия 3 построена на основе распределения давления в магнитожидкостной пробке, полученного в результате расчета с учетом

изменения поверхности магнитожидкостной пробки от центробежных сил и приложенного стороннего давления.

При сравнении полученных зависимостей видно, что учет деформации магнитожидкостной пробки позволяет максимально приблизиться к результатам, полученным по аналитическим формулам. Различие между зависимостями 1 и 3 связано с определением максимального перепада давления для неподвижного вала и с ростом частоты вращения эта начальная разница давлений остается практически неизменной. Расхождение между графиками 1 и 3 не превышает 5%.

Резкое снижение удерживаемого перепада давления с ростом частоты вращения вала, линия 2, связано с большими центробежными усилиями, действующими на полностью заполняющий рабочий зазор объем МЖ, которые за счет внутренних напряжений «вытягивают» жидкость из области минимального зазора под вершиной зубца.

Для вала диаметром 65 мм при увеличении частоты вращения до 15 000 об/мин (линейная скорость 51 м/с) максимальный удерживаемый перепад давления только из-за влияния центробежных сил снизился на 32%. В реальных условиях вязкостный разогрев МЖ приведет к еще более существенному снижению удерживаемого давления и потребует мер по дополнительному охлаждению зубцовой зоны МЖГ.

IV. ВЫВОДЫ

Разработанные численные математические модели для взаимосвязанного расчета магнитных и гидродинамических процессов в МЖГ позволяют оценить влияние центробежных усилий от вращающегося вала на удерживаемый МЖГ перепад давления.

Удерживаемый перепад давления, получаемый в результате расчета по аналитическим формулам, на всем диапазоне частот вращения получается выше, чем при численном расчете. Лучшее совпадение с аналитическим решением дает численный расчет с учетом деформации магнитожидкостной

пробки под действием центробежной силы и приложенного перепада давлений. В этом случае разница в результатах не превышает 5% и связана в первую очередь с определением удерживаемого перепада давления при неподвижном вале.

Допущение о полном заполнении рабочего зазора магнитной жидкостью сильно занижает удерживаемый перепад давления при больших частотах вращения. Однако сильная экономия времени на создание и расчет численной модели с данным допущением делает оправданным ее использование при малых, до 10 м/с, линейных скоростях на поверхности вала.

В качестве дальнейшего развития работы можно рассматривать учет влияния на удерживаемый МЖГ перепад давления изменения вязкостных и магнитных свойств МЖ из-за разогрева при вращении вала.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Орлов Д.В., Михалев Ю.О., Мышкин Н.К., Подгорков В.В., Сизов А.П. Магнитные жидкости в машиностроении. Москва: Машиностроение, 1993, 275 с.
2. Казаков Ю.Б. Численное определение положения магнитной жидкости в магнитожидкостном герметизаторе // Электротехника. 2002. №1. С. 51-55.
3. Radionov A., Podoltsev A., Zahorulok A. *Finite-Element Analysis of Magnetic Field and the Flow of Magnetic Fluid in the Core of Magnetic-Fluid Seal for Rotational Shaft* // Procedia Engineering. 2012. Vol. 39. P.327-338. doi:10.1016/j.proeng.2012.07.038.
4. Radionov A., Podoltsev A., Peczkis G. *The Specific Features of High-Velocity Magnetic Fluid Sealing Complexes* // Open Eng. 2018. Vol. 8. P.539-544. doi:10.1515/eng-2018-0066.
5. Chen Y., Li D., Li Z., Zhang Y. *Numerical Analysis on Boundary and Flow Regime of Magnetic Fluid in the Sealing Clearance With a Rotation Shaft* // IEEE Transactions on magnetics. 2019. Vol.55., no.2. 4600207. doi:10.1109/TMAG.2018.2882162.
6. Нестеров С.А., Егоров И.С. *Анализ процессов в магнитожидкостном герметизаторе с учетом деформации магнитной жидкости* // Вестник ИГЭУ. 2022. Вып. 1. Стр. 54-63. DOI: 10.17588/2072-2672.2022.1.054-063
7. Nesterov S.A., Stradomsky Yu.I., Belov V.S. *Study of Interconnected Physical Processes in the Magnetic Fluid Sealer* // Problems of the Regional Energetics. 2021. Vol. 3 (51). P.1-9. DOI: 10.52254/1857-0070.2021.3-51.01.
8. Берковский Б.М., Медведев В.Ф., Краков М.С. Магнитные жидкости. Москва: Химия. 1989. 240 с.

Ноздрюхин А. А.¹, Климов А. В.¹, Садыков М. Э.², Сулейманов Е. Г.²

¹ООО «Инновационный центр «КАМАЗ»

²ПАО «КАМАЗ»

ТЕНДЕНЦИИ И ПРОБЛЕМАТИКА СОВРЕМЕННОГО ДВИГАТЕЛЕСТРОЕНИЯ ДЛЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Аннотация: развитие электротранспорта вызывает необходимость улучшения характеристик тягового электропривода, входящего в состав этих транспортных средств в части удельных показателей (кВт/кг), эффективности, стоимости, надежности и безотказности. Мировые тенденции в части использования определенного типа тягового двигателя, связаны с синхронными двигателями с постоянными магнитами (SPMSM и IPMSM). Такие двигатели обладают высоким КПД на низких и средних частотах вращения, что является наиболее оптимально в условиях городской среды. Синхронные двигатели с внутренним расположением постоянных магнитов (IPMSM), что исключает необходимость в дополнительном креплении магнитов на роторе, как в синхронных двигателях с поверхностными магнитами (SPMSM) и обладают высоким реактивным моментом, что позволяет улучшить эффективность двигателя на высоких частотах. Улучшение удельных показателей тяговых двигателей связано с применением современных материалов и технологий. Интенсификации охлаждения позволяет максимально использовать объем двигателя для создания полезной мощности. Развитие тяговых электродвигателей в РФ столкнулось с рядом проблем, решение которых является важной задачей.

Ключевые слова: тяговый электродвигатель, синхронные двигатели с постоянными магнитами, постоянные магниты, реактивный крутящий момент, электротранспорт, система охлаждения электродвигателя.

I. ВВЕДЕНИЕ

Рост цен на ископаемые топлива, волнения в нефтедобывающих регионах и опасения по поводу глобального потепления являются вызовом для перехода к более экологичным и энергоэффективным источникам энергии и внедрению мер по снижению выбросов углекислого газа в атмосферу. На долю транспортной

системы приходится почти треть общих выбросов парниковых газов. Чтобы уменьшить негативное влияние на экологию планеты, а также обеспечить стабильность и независимость транспортной системы от ископаемых ресурсов, уже в течение нескольких десятилетий ведущие страны мира преследуют курс на электрификацию и создание альтернативных силовых агрегатов легковых, грузовых транспортных средств и общественного транспорта.

Доля электрического транспорта стремительно увеличивается, однако электромобили по-прежнему обладают существенными практическими ограничениями с точки зрения дальности пробега. Основными компонентами электромобиля являются тяговый электродвигатель, силовой электронный преобразователь, контроллер и система накопления энергии. Автомобильная промышленность предпринимает усилия в направлении постепенного увеличения удельных характеристик аккумуляторов, сокращения времени зарядки и повышения эффективности электрической трансмиссии. Основным источником потерь мощности в электрической трансмиссии является электрическая машина, поэтому именно на развитие этой технической области направлено большое внимание.

II. ВИДЫ СОВРЕМЕННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ И ОСНОВНЫЕ ТРЕБОВАНИЯ, ПРЕДЪЯВЛЯЕМЫЕ К НИМ

В тяговых электрических приводах автономных электрических транспортных средств эффективность и производительность электрических машин оказывают прямое влияние на дальность хода, безопасность, комфорт движения и управления. Поэтому к характеристикам тяговых электродвигателей электрических транспортных средств предъявляются следующие требования [1-2]:

- высокий крутящий кратковременный момент на низкой скорости для большого ускорения и легкого подъема в подъем;
- диапазон регулирования скорости при постоянной мощности в 3 - 4 раза превышающий номинальную скорость;
- высокий КПД в широком рабочем диапазоне частот и моментов;
- способность к периодическим перегрузкам для обеспечения разгона, торможения и преодоления подъема;
- высокая удельная мощность на единицу массы для снижения общей массы и увеличения дальности пробега;

– высокая удельная мощность на единицу объема для упрощения компоновки;

– низкая стоимость изготовления и обслуживания;

– высокая надежность и безопасность.

На рис. 1 показана лепестковая диаграмма основных требований к тяговому электроприводу различных транспортных средств.



Рис. 1. Диаграмма основных требований к тяговому электроприводу

Анализ использования в тяговом электроприводе различных типов электродвигателей (рис.2) показал, что наибольшее применение получили синхронные двигатели с постоянными магнитами двух типов: синхронные двигатели с поверхностным расположением на роторе постоянных магнитов (SPMSM) и синхронные двигатели с встроенными в ротор постоянными магнитами (IPMSM). В первую очередь это связано с высокими удельными показателями таких двигателей. При этом IPMSM рядом преимуществ:

- встроенные магниты в железо ротора исключают необходимость дополнительного их крепления;
- особое расположение магнитов (рис.3) позволяет получить высокий реактивный момент [3].

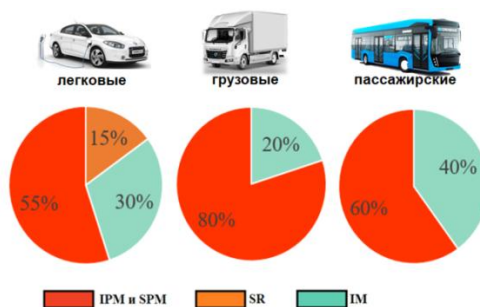


Рис. 2. Диаграммы применения различных типов электродвигателей на транспортных средствах

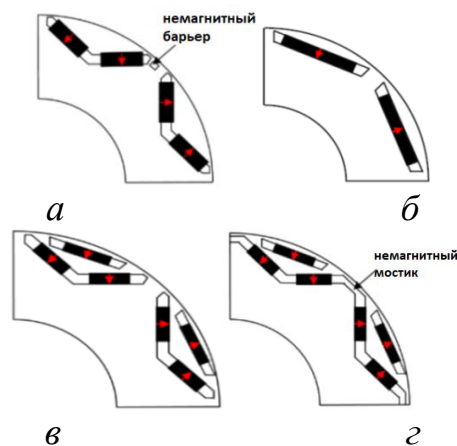


Рис. 3. Схемы расположения магнитов в IPMSM двигателе:
а – V-образная; *б* – тангенциальная; *в* – дельтаобразная; *г* – дельтаобразная с немагнитными мостиками

На рис. 4 показаны пиковая и номинальная моментно-скоростные характеристики тягового двигателя и области максимального КПД для различных типов электродвигателей [4]. Как видно IPMSM двигателя обладают максимальным КПД на низких и средних частотах вращения, что является наиболее оптимально в условиях городской среды.

На карту КПД (рис. 5 (б)) разрабатываемого в ПАО КАМАЗ электродвигателя типа IPMSM для электропортального моста электробуса были нанесены рабочие точки городского автобусного цикла (рис.5 (а)). Цикл представляет собой зависимости скорости электробуса и момента, требуемого от электродвигателя для обеспечения этой скорости, от времени. Как видно из карты КПД, большая часть рабочих точек цикла расположена в области средних и низких частот вращения двигателя, где КПД двигателя составляет 97%.

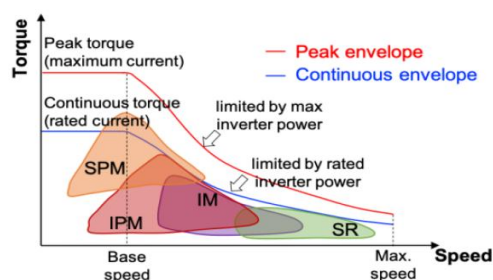
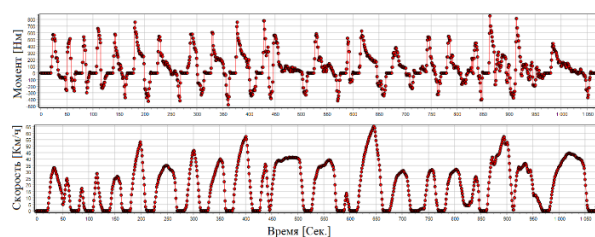
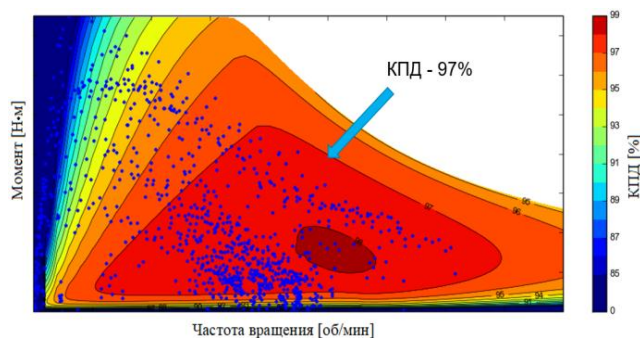


Рис. 4. Расположение областей максимального КПД различных типов двигателей при одинаковых пиковых и номинальных моментно-скоростных характеристиках этих двигателей



a



б

Рис. 5. Скоростные и моментные графики городского автобусного цикла (*a*) и карта КПД IPMSM двигателя для электробуса (*б*)

Из вышесказанного можно сделать вывод, что тенденции развития современного тягового электропривода направлены на применение IPMSM двигателей.

III. КОНСТРУКЦИИ СТАТОРОВ СОВРЕМЕННЫХ ТЯГОВЫХ IPMSM ДВИГАТЕЛЕЙ

В части изготовления статоров современных IPMSM тяговых двигателей наблюдаются следующие тенденции [2-5]:

- распределенная жесткосекционная обмотка с прямоугольным проводом;
- высокотемпературная изоляция. Класс изоляции свыше 180 °С;
- электротехническая сталь с высокой индукцией насыщения;
- применение компаундов с высокой удельной теплопроводностью.



a



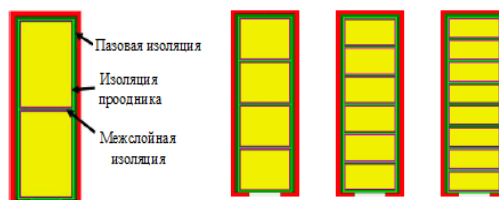
б

Рис. 6. Вид статора с насыпной (а) и жесткосекционной (б) распределенных обмоток

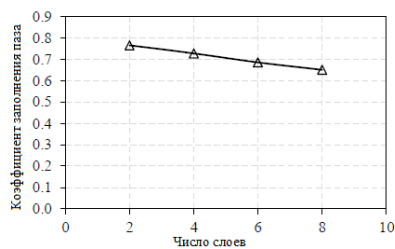
На рис. 6 показаны вид статоров с насыпной и жесткосекционной обмоткой.

Применение жесткосекционных обмоток с прямоугольным проводом позволяет снизить высокочастотные потери (АС потери) в обмотке двигателя от эффекта «вытеснения тока» и эффекта «близости» проводников, которые вызывают неравномерное распределение плотности тока по сечению проводника обмотки, а также увеличить коэффициент заполнения паза медью (порядка 0,6 по меди), что в свою очередь позволяет уменьшить потери от активного сопротивления обмотки (DC потери).

Исследования показывают [7], что АС потери и соответственно общие потери в обмотке зависят от числа и геометрии проводников в пазу. Увеличение числа слоев обмотки, то есть дробление витка на параллельные проводники, позволяет уменьшить АС потери в обмотке, однако при этом уменьшается коэффициент заполнения паза медью из-за увеличения площади изоляции проводников в пазу (рис.7). Из рис. 8 (а) видно, что потери в обмотке на 1000 об/мин. незначительны, но растут с увеличением числа слоев обмотки, это связано с уменьшением заполнения паза медью, то есть растут DC потери. При переходе работы двигателя на более высокие частоты, вклад АС потерь в общие потери в обмотке значительно увеличивается ((рис.8 (б)), при этом увеличение слоев обмотки значительно снижает эти потери.

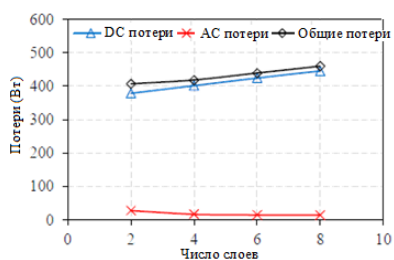


а

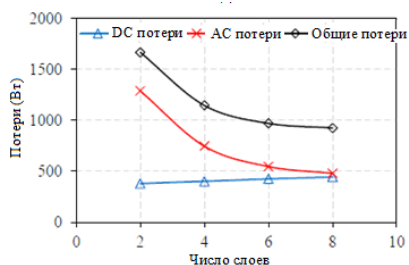


б

Рис. 7. Вид паза (а) и коэффициент заполнения паза (б) в зависимости от числа слоев обмотки



а



б

Рис. 8. Зависимости потерь в электродвигателе при различном числе слоев обмотки:
 а – 1000 об/мин, 200А, б – 12000 об/мин, 200А

IV. КОНСТРУКЦИИ РОТОРОВ СОВРЕМЕННЫХ IPMSM ДВИГАТЕЛЕЙ

Как уже говорилось ранее синхронные двигатели с IPM ротором имеют несколько весомых плюсов, таких как надежное крепление магнитов в железе ротора и создание значительного реактивного момента за счет особого

расположения магнитов и тем самым создания разницы магнитных проводимостей по осям d и q .

На рис.9 показаны основные схемы роторов IPMSM двигателей серийно разрабатываемых электромобилей.



Рис. 9. Схемы роторов IPMSM двигателей серийных электромобилей

Выбор той или иной схемы ротора связан с множеством факторов, для выбора наилучшей схемы нужен комплексный анализ использования разрабатываемого двигателя в транспортном средстве.

V. СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ СОВРЕМЕННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Повышение температуры отрицательно влияет на удельное сопротивление проводников, изоляционные свойства и силу магнитов. Возможность отводить большее количество тепла позволяет увеличить плотность тока в пазу статора, что позволяет при той же массе и размерах увеличить выходную механическую мощность и момент. Повышение плотности тока в проводниках является экономически более оправдано, поскольку позволяет увеличить механические характеристики используя менее дорогостоящие магнитные материалы [6-8].

На рис.10 показаны основные системы охлаждения, применяемые в тяговых электродвигателях.

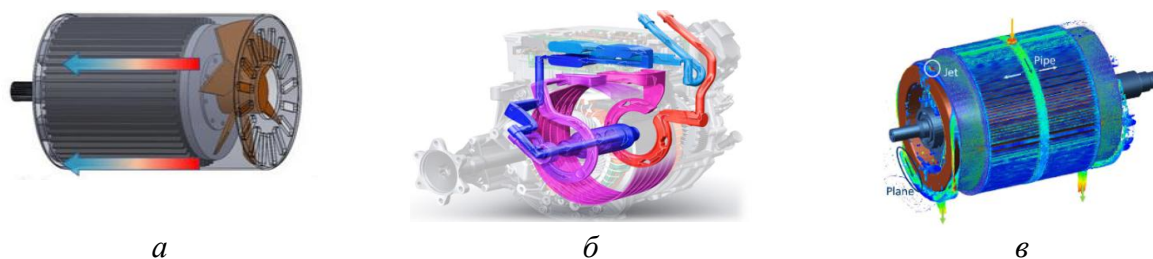


Рис. 10. Основные системы охлаждения современных тяговых электродвигателей:

a – воздушное охлаждения; *б* – водяное охлаждение ротора и статора;
в – непосредственное охлаждение статора и лобовых частей обмотки маслом

Расчеты показывают, что наиболее интенсивное охлаждения электродвигателя достигается при использовании масляного охлаждения.

На рис.11 показаны графики температуры различных частей двигателя при применении вышеописанных способах охлаждения.

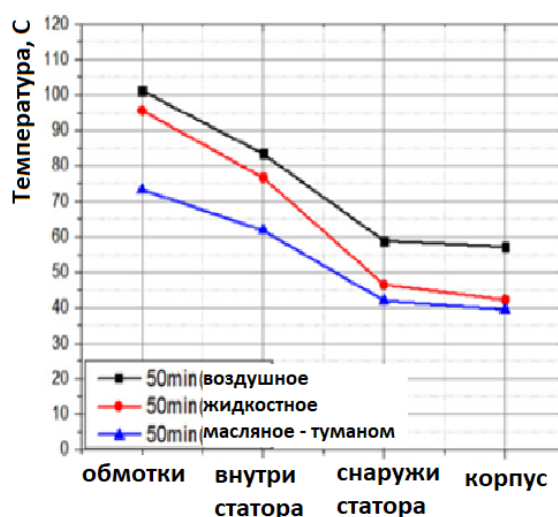


Рис. 11. Температуры частей двигателя при различных способах охлаждения

Можно заключить, что для достижения высоких удельных показателей при высокой плотности тока необходимо применение систем охлаждения, позволяющих интенсивнее отводить тепло от электродвигателя. То каким образом будет решена проблема теплоотвода будет сильно влиять на облик и характеристики электродвигателя.

VI. ПРОБЛЕМЫ ПРОИЗВОДСТВА СОВРЕМЕННЫХ ТЯГОВЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В РФ

Современное электродвигателестроение в РФ не стоит на месте. Усилиями ПАО «КАМАЗ» в кооперации с ведущими заводами по производству электрических машин ведутся работы по разработке и производству целой линейки IPMSM двигателей, как для легковых так и для тяжелых магистральных электрических транспортных средств. Однако в процессе разработки и производства возникли ряд проблем:

- отсутствие в РФ электроизоляционных материалов проводов, которые обладают высокой механической и электрической прочностью при малой толщине;
- недостаток выбора компаундов с высокой удельной теплопроводностью, механическими и электрическими свойствами;
- устаревшая технологическая база по производству электрических машин, требующая глубокой модернизации;
- необходимость локализации производства высококоэрцитивных магнитов;
- отсутствие отечественных высокооборотистых подшипников качения (свыше 10000 об/мин), в том числе электроизоляционных;
- отсутствие отечественных высокоточных датчиков положения (резольверы) на частоты вращения свыше 10000 об/мин;
- недостаток выбора высоковольтных и низковольтных герметичных разъемов.

Решение этих проблем требует комплексный подход ведущих научно-производственных предприятий.

VII. ВЫВОДЫ

Проведенный анализ современных тяговых электродвигателей показал, что большее применение в современных приводах электрических транспортных средств получили IPMSM двигатели. Такие двигатели обладают лучшими

удельными показателями и высоким КПД в широком диапазоне частот вращения и моментов. Тенденции разработки и изготовления статоров IPMSM двигателей направлены на применение жесткосекционных обмоток волнового типа. Ротора IPMSM двигателей имеют различные схемы, которые обладают преимуществами и недостатками, применение той или иной схемы зависит от множества факторов. Интенсификация охлаждения электродвигателя один из способов улучшения удельных показателей электропривода в целом. Проблемы производства современных тяговых электродвигателей в основном связаны с недостатком современных материалов, комплектующих и устаревшей технологической базой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Lopez I., Matallana A., Ibarra E., Andreu J. Next generation electric drives for HEV/EV propulsion systems: Technology, trends and challenges // *Renewable and Sustainable Energy Reviews*-2019.-№114.- с. 1-23.
2. Urase K., Kiyota K., Sigimoto H., Energy Efficiency of SR and IPM Generators for Hybrid Electric Vehicle // *IEEE Transactions on Industry Applications*-2015. Vol. 51, № 4. – с. 2874–2883.
3. Shao L. et al. Design Approaches and Control Strategies for Energy-Efficient Electric Machines for Electric Vehicles - A Review. *IEEE Access*. 2020. Vol. 8.
4. Urase K. et al. Energy Efficiency of SR and IPM Generators for Hybrid Electric Vehicle. *IEEE Trans. Ind. Appl. IEEE*, 2015, Vol. 51, pp. 2874–2883.
5. Huang Z. и др. Loss Calculation and Thermal Analysis of Rotors supported by Active Magnetic Bearings for High-speed Permanent Magnet Electrical Machines // *IEEE Trans. Ind. Electron.* 2015. С. 1–1.
6. Popa D.-C., Fodorean D. Design and performances evaluation of a high speed induction motor used for the propulsion of an electric vehicle // *2014 International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. IEEE*, 2014. С. 88–93.
7. Nguyen B.-H., Do H. V., Minh C.T. High Performance Current Control of IPMSM for Electric Vehicles Drives Using Disturbance Observer // *2015 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). IEEE*, 2015. С. 1–5.
8. Gerada D. и др. High Torque-Density In-Wheel Electrical Machine for an Electric Bus // *2016 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC). IEEE*, 2016. С. 1–6.

Чабанов Е. А., Опарин Д. А., Коротаев А. Д., Ключников А. Т., Фалалеев Д. В.,
Кавалеров Б. В.

ПНИПУ

ОПЫТ РАЗРАБОТКИ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ В ПНИПУ¹

Аннотация: В статье представлены результаты работы кафедры электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) по проектированию и созданию автоматизированных электроприводов возвратно-поступательного движения для исполнительных механизмов различного назначения на базе линейных электродвигателей собственной разработки. Сотрудники кафедры не только рассчитывают и проектируют линейные электродвигатели, но также изготавливают опытные образцы и синтезируют системы управления этими электродвигателями. В статье представлены две такие разработки: для нефтедобычи и для машиностроения.

Ключевые слова: линейный электродвигатель, электромеханическая система, электропривод, система автоматического управления.

I. ВВЕДЕНИЕ

Известно, что создание и использование электродвигателей линейного возвратно-поступательного движения способно обеспечить существенный выигрыш в сравнении с традиционным вращательным приводом для рабочих органов различных производственных механизмов, станков и манипуляторов ввиду возможности отказаться в этом случае от механических преобразователей вращательного движения в возвратно-поступательное [1].-[3]. В Пермском национальном исследовательском политехническом университете (ПНИПУ) сложилась одна из первых в стране научных школ по линейным электродвигателям (проф. Н.В.Шулаков, проф. Е.М.Огарков, доц. А.Д.Коротаев, доц. Тиунов В.В., доц. Чабанов Е.А. и др.). Кафедра электротехники и электромеханики (ЭТиЭМ) ПНИПУ проводит теоретические и экспериментальные исследования, разрабатывает действующие образцы электродвигателей и систем управления ими уже на протяжении трех десятилетий [4]-[7] По результатам исследований в этой области защищено более десяти диссертаций. В настоящее время развитие исследований в данной

¹Статья подготовлена при финансовой поддержке российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств по государственному заданию FSNM-2020-0028.

научной школе ведется посредством грантов и программы финансирования научных исследований. В настоящей статье представлены результаты полученные по двум из них: а) в рамках Постановления правительства РФ № 218 от 09.02.2010 о кооперации российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств; б) по госзаданию российских образовательных организаций высшего образования, государственных научных учреждений и организаций реального сектора экономики в целях реализации комплексных проектов по созданию высокотехнологичных производств.

В настоящее время в ПНИПУ продолжают инициативные научно-исследовательские работы по созданию и разработке линейных электродвигателей. Получены оригинальные результаты, которые подтверждены расчетами, моделированием, результаты апробированы на предприятиях (АО «Мотовилихинские заводы», г.Пермь). Результаты теоретически обосновываются. Изготовлены опытные образцы. Промышленные предприятия сейчас все активнее выражают заинтересованность в таких разработках. Но нехватка финансирования, по-прежнему, серьезно сдерживает работу, вызывает отставание от научных школ КНР, которые сейчас лидируют в мире. Поэтому реалии нынешней экономики заставляют все активнее использовать практику инновационного менеджмента и инновационных проектов при выведении продукции на рынки.

II. ОПЫТНЫЕ ОБРАЗЦЫ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрим два проекта, в результате которых были изготовлены опытные образцы линейных электродвигателей.

А. Для нефтедобычи

Первый проект проводился по Постановлению правительства РФ № 218 в интересах индустриального партнера – АО «Мотовилихинские заводы», крупнейшего предприятия г.Перми, специализирующегося, в том числе на

ствольных технологиях, и был направлен на разработку привода для насосов в нефтедобывающей промышленности.

Повышенная актуальность этого проекта для нефтяной отрасли была, прежде всего, в том, что добычи нефти является важной государственной задачей Российской Федерации. Перевод отечественной экономики на инновационный путь развития не исключает, но, напротив, предусматривает опережающее внедрение новых научных результатов на предприятиях топливно-энергетического комплекса. Основной на сегодня способ добычи нефти с помощью станков-качалок не удовлетворяют требованиям развития отрасли. Проблема добычи нефти на средне- и малодобитных скважинах, а также на скважинах глубиной от 2000-3000 м и более не имеет практического разрешения на существующей базе. Невозможность использования для таких скважин (на такой глубине) станков-качалок требует разработки принципиально новых конструкций электропривода. Многие месторождения РФ имеют осложненные условия добычи. А для использования истощенных месторождений требуется повышение глубины вновь вводимых скважин [15]-[18]. В существующей международной практике в этом вопросе на сегодня следует констатировать достижение определенного консенсуса: единственно приемлемый вариант, который рассматривается – это использование электропривода нового поколения с возвратно-поступательным движением.

На сегодня ведущим разработчиком таких двигателей в мировой практике является КНР, причем получить информацию по многим их передовым разработкам достаточно сложно. Известно, что, например, в Шенлинской нефтяной корпорации (КНР) в сравнении с балансирующим станком-качалкой электропривод нового поколения, на базе вентильных линейных двигателей, позволил: сократить площадь установки оборудования на 30 - 50%; увеличить эффективность извлечения нефти на 60 - 90%. Это обстоятельство позволяет сделать вывод о том, что в скором времени электропривод нового поколения сможет заменить балансирующие станки-качалки для добычи нефти во всем мире.

Линейные двигатели для этой задачи могут иметь различную конструкцию, первоначально наиболее широко проводились работы по применению цилиндрических асинхронных линейных двигателей (ЦЛАД), например, в ПермНИПИнефть [12]-[15]. В открытой печати было опубликовано большое количество вариантов технических решений и авторских свидетельств по вопросу бесштанговой добычи нефти из скважин. Тем не менее практического применения электропривода на основе ЦЛАД не получили из-за низких энергетических характеристик таких двигателей и сложности управления асинхронными двигателями. Удельное усилие их составляло порядка $(900 \div 1100)$ Н/м, поэтому для получения необходимого тягового усилия длину ЦЛАД нужно было увеличивать до $(25-40)$ метров, что технически осуществить не представлялось возможным. В 80-х годах высказывалась идея использования для добычи нефти линейного вентильного двигателя с совмещенной (двухфункциональной) обмоткой [16]-[17].

ЦЛВД с совмещенной обмоткой по сравнению с ЦЛАД позволяет примерно в $(1,5-2,0)$ раза увеличить удельное тяговое усилие, но имеет ряд существенных недостатков, ограничивающих возможность применения этого двигателя для бесштанговой добычи нефти из скважин. Главные недостатки двигателя с совмещенной обмоткой следующие:

1. Подача питания должна осуществляться шестижильным кабелем.
2. Сложность силовой схемы электронного коммутатора и системы управления двигателем.

По этой причине цилиндрические линейные вентильные двигатели с совмещенной обмоткой также не нашли применения при создании бесштангового электропривода погружных плунжерных насосов. За последние двадцать лет в области промышленного производства высококоэрцитивных постоянных магнитов был совершен значительный прорыв, открывший новое направление линейного привода.

Наибольшего прогресса в разработке линейного погружного электродвигателя добились ученые из КНР. Ими был разработан линейный

синхронный двигатель с частотным управлением, в составе вторичного элемента которого используются редкоземельные постоянные магниты. Он проходил опытно-промышленные испытания в ряде российских нефтедобывающих компаний таких как «Лукойл» и «РН-Няганьнефтегаз» [18].

Параллельно с КНР разработкой ЦЛВД на основе редкоземельных постоянных магнитов начали заниматься ученые кафедры ЭТиЭМ ПНИПУ [19]-[25].

В результате этих исследований, на кафедре ЭТиЭМ ПНИПУ в 2013 году одним из первых в РФ создан модуль опытно-экспериментального образца цилиндрического линейного вентильного двигателя (ЦЛВД) (рис.1). В ходе выполненных исследований получены новые теоретические материалы, которые в перспективе должны составить основу новой методологии создания подобных электроприводов нового поколения.

Опытные образцы двигателя, разработанные на кафедре ЭТиЭМ, имеют удельное тяговое усилие на метр длины статора не более 4000 Н. [25]-[25]. Для создания насосного агрегата необходим ЦЛВД не превышающий длиной 8 метров, а такое возможно, только если он будет развивать удельное тяговое усилие 5000 Н/м. Помимо самой конструкции двигателя кафедрой была разработана новая методика расчета электромагнитного поля ЦЛВД, позволяющая рассчитать тяговое усилие двигателя [27]-[28]. Но эта методика содержит предварительные операции по приведению ЦЛВД к вращающейся синхронной машине, что значительно усложняет решение поставленной задачи. Кроме того данный метод не подразумевает расчета рабочих характеристик двигателя. Поэтому в перспективе нужны новые исследования, новая методология.



Рис. 1. Модуль ЦЛВД на экспериментальном стенде

В результате освоения новой разрабатываемой методологии станет возможным впервые в РФ создать промышленный образец электропривода нового поколения для нефтедобычи как на существующих средне- и низкодебитных скважинах, так и для сверхглубоких скважин. Тем самым текущая проблемная ситуация получит свое разрешение.

Имеющийся задел у научного коллектива позволит в краткие сроки при должной финансовой поддержке решить все основные вопросы как теоретических исследований, так и практической конструктивной реализации ЦЛВД, что даст возможность приступить к широкомасштабному созданию бесштанговых электронасосных агрегатов для скважин глубиной от 2000 м и более. Кроме того за годы добычи нефти в мире накопилось много отработанных скважин, а при использовании нового электропривода с ЦЛВД возможно эффективно добывать нефть и в этих скважинах.

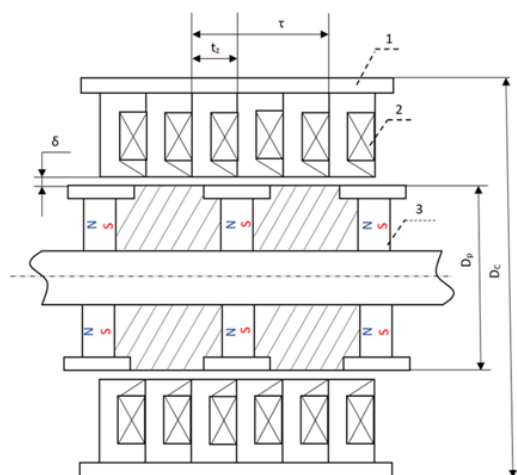


Рис. 2. Продольный разрез ЦЛВД

Разработанный ЦЛВД (рис. 2) конструктивно состоит из цилиндрического корпуса 1; индуктора 2, с трехфазными обмотками; а также вторичный элемент с возможностью возвратно-поступательного движения 3, который содержит множество постоянных магнитов. Индуктор 2 неподвижно установлен в корпусе 1 и представляет собой множество катушек образующих трехфазную обмотку, которая создает бегущее магнитное поле вдоль оси корпуса.

ЦЛВД состоит из отдельных микромодулей длина которых составляет 0,1 метра, в зависимости от необходимого тягового усилия можно изменять число микромодулей и длину реального ЦЛВД. На кафедре электротехники и электромеханики Пермского национального исследовательского политехнического университета (ПНИПУ) был спроектирован и изготовлен модуль ЦЛВД (Рис.1), а также система управления для него. Номинальное усилие двигателя составляет 4 кН при длине один метр и фазном токе 30 А [29].

Особенностью вентильного двигателя (ВД) является использование преобразователя частоты – коммутатора (ПЧ), работающего согласованно с датчиком положения ротора (ДП). При таком сочетании синхронного двигателя с преобразователем и датчиком положения электрическую машину можно называть бесконтактный двигатель постоянного тока или вентильный двигатель. Таким образом, основой для требований к цилиндрическому линейному вентильному двигателю (ЦЛВД) является теория синхронных машин (двигателей). При заданных параметрах схемы замещения ЦЛВД определяющим является расчет электромагнитной мощности на валу, которая для электрических машин равна

$$P_{\text{э}} = (m * U * E * \sin \theta) / (X_d) + ((m * U^2) / 2) * (1/X_q - 1/X_d) * \sin 2\theta,$$

где: U, E – напряжения питания и ЭДС фазной обмотки,

X_d – индуктивное сопротивление по продольной оси d, зависит от величины магнитного потока по оси d,

X_{ad} – индуктивное сопротивление взаимоиндукции по оси d, тогда $X_d = X_{ad} + X_{\sigma 1}$,

$X_{\sigma 1}$ - индуктивное сопротивление, обусловленное магнитным потоком рассеяния статорной обмотки,

X_q – индуктивное сопротивление по поперечной оси q ,

X_{ad} – индуктивное сопротивление взаимоиндукции по оси q , тогда $X_q = X_{aq} + X_{\sigma 1}$

Рассчитанные предварительные характеристики ЦЛВД были использованы для расчета привода и системы управления двигателем.

Управление модулем ЦЛВД с помощью преобразователя частоты, как показали предварительные расчеты, должно осуществляться в диапазоне частот (0,5...7) Гц. Существующие на рынке преобразователи позволяют регулировать обороты двигателей переменного тока при бездатчиковом управлении в диапазоне (0,5...50) Гц. Этот диапазон частот существенно выше необходимого для регулирования скорости движения вторичного элемента ЦЛВД, поэтому для необходимого диапазона частот нужно было создавать новую систему управления модулем ЦЛВД, используя при этом возможности имеющегося преобразователя частоты (ПЧ) совместно с программируемым микроконтроллером, который подключается на вход ПЧ. Для создания системы автоматического управления (САУ) потребовалась разработка алгоритма функционирования САУ для ЦЛВД.

Испытание работоспособности модуля ЦЛВД при движении штока производились на экспериментальном стенде, функциональная схема которого показана на Рис.3. При этом испытание двигателя осуществлялось от механического коммутатора в шаговом режиме. Испытания показали, что ЦЛВД может поднимать груз с максимальным весом 3 кН (Рис.1).

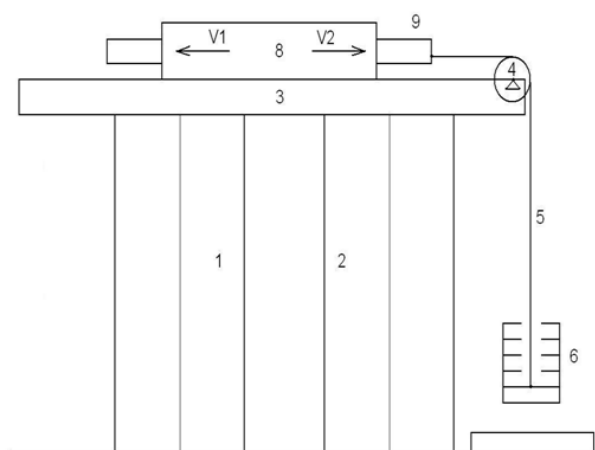


Рис. 3. Механическая схема испытательного стенда

На рис. 3 показана схема стенда, реализованного в натуральную величину. В качестве основы для стенда использованы два шкафа 1, 2 с высотой порядка $H=2\text{м}$. Поверх двух основ закреплена металлическая балка 3, на одном конце которой установлен шкив 4. Через шкив перекинут трос 5, на конце которого закреплен суммарный груз 6, состоящий из нескольких элементов. На земле необходим амортизатор 7 для смягчения удара груза при его опускании (падении). Цилиндрический двигатель 8 установлен неподвижно поверх балки 3. Ротор 9 (шток) тянет груз 6 через блок 4 и создает силу, которая уравнивает вес груза, а также преодолевает силы трения в двигателе. Таким образом, груз поднимается с нулевой высоты, когда магнитное поле статора движется влево. При реверсе двигателя шток движется вправо под воздействием веса груза (попутная нагрузка), когда сила тяжести превышает силы трения в двигателе и груз падает на амортизатор. В этом случае появляется генераторный режим двигателя, который в погружном насосном агрегате отсутствует, так как при обратном ходе штока ЦЛВД также находится в двигательном режиме, но со значительно меньшим усилием. Следовательно, для экспериментальных исследований модуля ЦЛВД достаточно измерить усилие при движении груза вверх, в двигательном режиме.

После этого проводились экспериментальные исследования модуля ЦЛВД в динамическом режиме при питании обмотки статора от электронного коммутатора в ручном режиме. Возвратно-поступательное движение штока осуществлялось переключателем на пульте электронного коммутатора. При этом следует учесть, что электромагнитная сила превышает силу, зафиксированную динамометром, на величину сил трения штока в подшипниках.

Для работы двигателя и стендовых испытаний была создана система управления, обеспечивающая возвратно поступательное движение вторичного элемента. Функциональная схема системы управления ЦЛВД показана на рис. 4. Эта система состоит из следующих основных элементов: ВВОД – ввод исходных данных в базу персонального компьютера; ПК – персональный компьютер; ЭМ – электромеханический модуль ЦЛВД; ДТ – встроенный в модуль датчик температуры обмотки индуктора; ДП – встроенный в модуль датчик положения вторичного элемента. Управление модулем ЦЛВД с помощью преобразователя частоты (ПЧ) осуществляется в диапазоне частот (0.5÷6) Гц для получения необходимых скоростей перемещения вторичного элемента. В модуль ЦЛВД встроены: датчик измерения температуры обмотки индуктора ДТ и датчик нулевого положения вторичного элемента ДП.

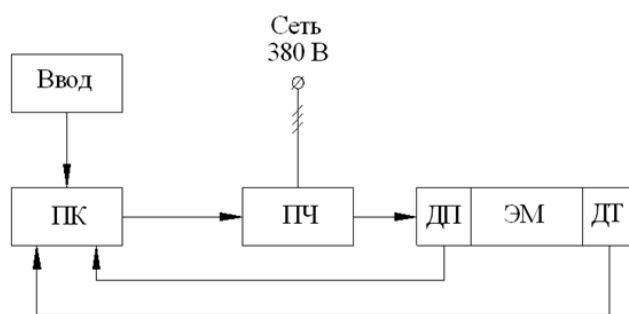


Рис. 4. Функциональная схема управления ЦЛВД

Датчик измерения температуры необходим для контроля температуры обмотки двигателя. Модуль преобразователя информации выполнен на базе ПК. Программное обеспечение реализовано на языке С+ в среде Microsoft Visual Studio 2010 и ориентировано к использованию на промышленном или

персональном компьютере. Персональный компьютер (ПК) связан с преобразователем частоты по кабельной линии связи стандарта RS-485 (с помощью преобразователя интерфейсов RS-485/USB) на базе протокола ModBus. В соответствии с временной диаграммой работы двигателя производится формирование управляющих команд, передаваемых по шине RS-485 на блок ПЧ.

Внешний вид работы управляющей программы с регистрацией трендов измерений показан на рис. 5.

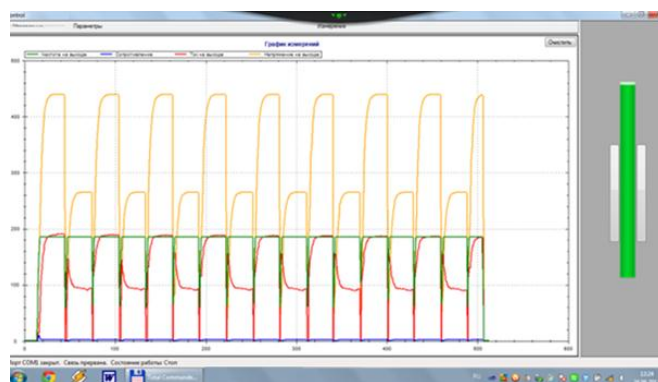


Рис. 5. Внешний вид интерфейса измерений

В качестве научно-исследовательской деятельности предполагается создание принципиально новой системы управления ЦЛВД с возможностью использования для различных двигателей не только дискретного и векторного управления, но и адаптивных и оптимальных алгоритмов управления, с непрерывным в темпе процесса уточнением математической модели с помощью идентификации в реальном времени. В результате формируется гибкий производственный модуль с возможностью адаптации к изменяющимся условиям. Полученные системные решения могут быть применены не только в нефтедобыче, но и в областях науки и техники относящихся к производственной или хозяйственной деятельности.

В. Для машиностроения

В соответствии с госзаданием FSNM-2020-0028 в 2021 г. разработан опытный образец ЦЛВД с постоянными магнитами для электропривода шлифовального (плоскодоводного станка).

Принцип действия шлифовального станка основан на применении электропривода исполнительного механизма, который обеспечивает возвратно-поступательное линейное движение вторичного элемента (рабочего органа), который связан непосредственно с электродвигателем типа ЦЛВД с помощью штока. Преимущество ЦЛВД в данном устройстве заключается в наличии момента, удерживающего вторичный элемент за счет постоянных магнитов, установленных на нем [30]. Также подобный электропривод обеспечивает быстрое перемещение рабочего органа.

На обмотку ЦЛВД подается трехфазное напряжение от специального источника электроэнергии (преобразователя частоты), который может находиться в непосредственной близости или на удалении от исполнительного механизма. Преобразователь частоты управляется микроконтроллером совместно с персональным компьютером и формирует напряжение специальной формы необходимой частоты [31].

Исследования подтвердили, что для выполнения шлифовальным станком возложенной функции (обработка поверхности деталей) при заданных параметрах (прижимное усилие, расстояние и усилие перемещения планшайбы) наиболее целесообразно использовать из всех возможных конструкций линейных двигателей именно ЦЛВД. На основе произведенных расчетов была определена геометрия экспериментального модуля ЦЛВД и параметры трехфазной обмотки индуктора. Выполнен эскизный проект модуля, согласно которому проводились работы по его изготовлению. Магниты вторичного элемента в соответствии с расчетом, производимым в связи с рационализацией конструкции линейного двигателя, применялись из материала неодим-железобор производства ПОЗ-Прогресс (Российская Федерация, Свердловская область, город Верхняя Пышма).

При производстве модуля линейного двигателя корпус изготавливался из металлической трубы, внутренняя поверхность которой обрабатывалась по классу Н8. Чашки магнитопровода цилиндрического индуктора производились

из стали Ст45. По внешней кромке чашек фрезеровались вырезы для выводов обмоток, укладываемых в них (рис. 6–7).

Согласно проведенному расчету конструкции ЦЛВД магнитопровод индуктора состоит из 12 чашек, каждая высотой 10 мм, диаметром 105 мм (рис. 6–7). Внутри каждой чашки размещаются кольцевые обмотки, концы которых выводятся через боковые вырезы чашки. На рис. 7 показаны выводы катушек фазы А. В пределах каждого выреза колец катушки соединяются между собой перемычками и образуют фазные обмотки А, В, С.

Подвижная часть двигателя (вторичный элемент) состоит из немагнитного штока, на который насаживаются полюса из стали. Внутри полюса размещаются кольцевые магниты с аксиальным намагничиванием, а сами полюса соединяются с помощью промежуточных немагнитных колец, изготовляемых из нержавеющей стали.

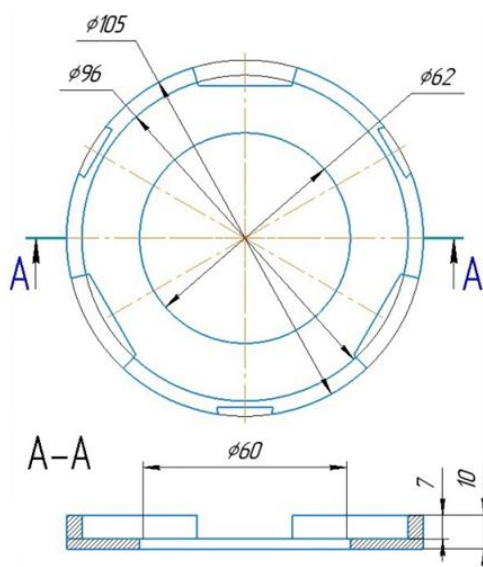


Рис. 6. Чашка индуктора

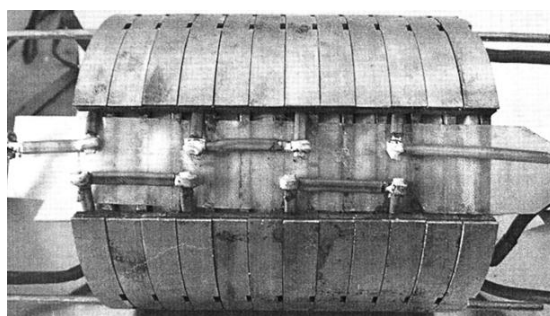


Рис. 7. Выводы фазы А обмотки индуктора



Рис. 8. Полюса и промежуточные кольца вторичного элемента

На рис. 9 показан вторичный элемент с магнитами в сборе. При сборке вторичного элемента в каждый полюс устанавливался магнит, после чего пакет полюсов насаживался на немагнитный шток.



Рис. 9. Секция вторичного элемента с магнитами в сборе

На рис. 10 представлен ЦЛВД в сборе.



Рис. 10. ЦЛВД в сборе

Структурная схема испытательного стенда для снятия статических тяговых усилий, развиваемых разработанным и изготовленным маломощным ЦЛВД, представлена на рис. 11

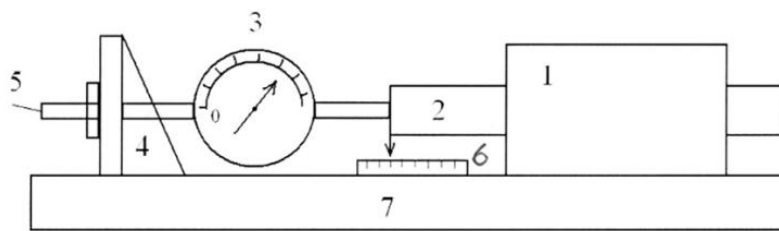


Рис. 11. Испытательный стенд для снятия тяговых характеристик ЦЛВД:
 1 – статор; 2 – вторичный элемент; 3 – динамометр; 4 – опорная стойка;
 5 – болт для фиксации вторичного элемента; 6 – мерная линейка смещения
 вторичного элемента; 7 – основание

Расчет тягового усилия F_p был произведен на базе методики, которая изложена в отчете FSNM-2020-0028. Расчетная зависимость тягового усилия на рис. 12 показана пунктиром, а экспериментальная сплошной линией.

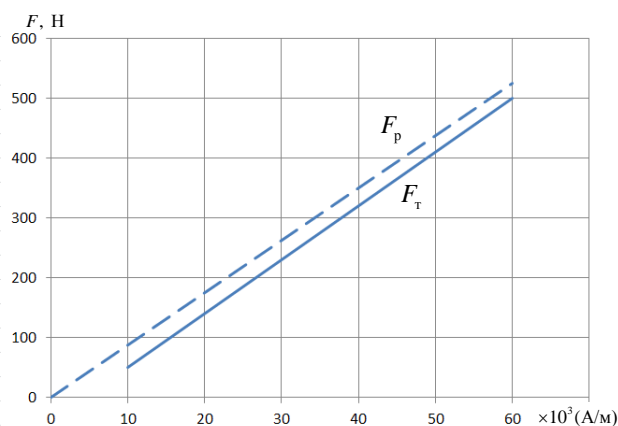


Рис. 12. Зависимость тяговых усилий от линейной токовой нагрузки ЦЛВД

Испытания цилиндрического вентильного двигателя, который был спроектирован специально для шлифовального станка, прошли успешно во всех предусмотренных режимах. Была подтверждена высокая степень сходимости расчетных и экспериментальных значений тягового усилия, развиваемого опытным образцом. Погрешность результатов не превысила 8%.

С. Для перспективных разработок

Помимо рассмотренных опытных образцов в настоящее время на кафедре ЭТиЭМ ведутся работы по расчету и проектированию линейных электродвигателей для робототехники. Здесь сотрудничество ведется с Пермскими робототехниками. Также прорабатываются решения в интересах ПАО «Газпром». Здесь возможно создание с линейным приводом робототехнических комплексов и системы точного позиционирования в системах различного назначения. Организация привода многокоординатных перемещений по одной, двум и трем координатам. Применение в роботизированных комплексах с возможностью организации большого количества степеней свободы. Управление различным технологическим оборудованием: для управления технологическими задвижками и клапанами, дозирующими устройствами и др., для замены традиционного вращательно электропривода в перспективных системах и при проводимой их модернизации.

В настоящий момент также ведутся разработки миниатюрных линейных двигателей для протезов и манипуляторов, линейных двигателей средней мощности для работы в качестве приводов мембранных насосов и поршневых компрессоров и линейных импульсных двигателей для запорной арматуры водоснабжения. В этих разработках принимают участие студенты ПНИПУ, серьезную поддержку здесь оказывают студенческие гранты на проведение таких исследований.

Для разработок применяются следующие варианты конструкции линейных двигателей: асинхронные, синхронные с постоянными магнитами, вентильные, постоянного тока.

Использование того или иного принципа действия линейного электродвигателя зависит от конкретных задач, где использование избранного варианта наиболее целесообразно. В общем случае любой линейный электродвигатель состоит из двух основных конструктивных частей: цилиндрический или линейный индуктор с катушками; цилиндрический или

линейный вторичный элемент (слайдер), который совершает поступательные или возвратно-поступательные движения.

III. БЛАГОДАРНОСТИ

Авторы с благодарностью отмечают вклад старшего преподавателя кафедры ЭТиЭМ ПНИПУ Зиятдинова Ильи Рудольфовича в представленном научном исследовании при подготовке заявок на патенты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Application of linear asynchronous motors for high-speed ground transport Akhatov S.T., Solonenko V.G., Makhmetova N.M., Kosenko S.A., Ivanovtseva N.V., Malik A.A./ Известия Национальной академии наук Республики Казахстан. Серия геологии и технических наук. 2021. Т. 2. № 446. С. 21-36.
2. Линейный синхронный двигатель для наземных транспортных средств/ Дроздов С.В., Веселков Е.Л. В сборнике: Современные инновации в технике и производстве. Сборник материалов II Международной научно-практической конференции. Псков, 2022. С. 64-67.
3. Линейные двигатели для повышения экологичности промышленных предприятий/ Соломин В.А., Трубицина Н.А., Замшина Л.Л. В сборнике: Транспорт: наука, образование, производство. Сборник научных трудов международной научно-практической конференции. Ростов-на-Дону, 2022. С. 67-70.
4. Experimental investigation of linear induction motors edge effect compensation/ Tiunov V. В сборнике: 2020 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2020. 2020. С. 9271640.
5. Practical application and methods of calculation for linear induction motors/ Tiunov V.В сборнике: 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies, FarEastCon 2018. 2018. С. 8602929/
6. Оптимизация вторичного элемента цилиндрического линейного вентильного двигателя/ Тимашев Э.О., Чирков Д.А., Шулаков Н.В., Коротаев А.Д. Вопросы электротехнологии. 2019. № 1 (22). С. 35-39/
7. Расчет основных параметров цилиндрического линейного вентильного двигателя по схеме замещения /Чирков Д.А., Коротаев А.Д., Ключников А.Т. Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике. 2016. Т. 1. С. 144-149.
8. Адонин, А.Н. Добыча нефти штанговыми насосами / А.Н. Адонин. - М.: Недра, 1979. - 425 с.
9. Адонин, А.Н. Процессы глубиннонасосной добычи нефти / А.Н. Адонин. - М.: Недра, 1964. - 263 с.
10. Добыча нефти штанговыми насосами / А. К. Мухаметзянов, И. Н. Чернышов, А.И. Липерт, С.Б. Ишемгужин. - М.: Недра, 1993. - 352 с.
11. Нефть новой России. Ситуация, проблемы, перспективы / Общ. ред. В. Ю. Александров, Российская академия естественных наук (РАЕН). - М.: Древлехранилище, 2007. - 688 с.
12. Локшин, Л.И. Глубинный плунжерный насос с цилиндрическим индукторным двигателем / Л.И. Локшин, В.В. Семенов // Электропривод с линейными электродвигателями : Труды всесоюзной научной конференции. – Киев: 1976. - С. 39-43. – 2 т.
13. Линейные погружные электронасосы / Л.И. Локшин, В.В. Семенов и др. // Тезисы докладов Уральской конференции по магнитной гидродинамике. – Пермь, 1974.

14. Локшин, Л.И. К вопросу создания бесштангового насоса с линейным электроприводом / Л.И. Локшин, А.Н. Сюр, Г.А. Чазов // Машины и нефтяное оборудование. – М.: 1979. - №12.
15. Семенов, В.В. Регулирование в процессе разработки залежи с использованием линейного двигателя плунжерного насоса / В.В. Семенов, Г.А. Чазов; ПермНИПИнефть // Особенности геологии и разработки нефтяных месторождений Пермского Приуралья: сб. науч. тр.. – М.: ИГ и РГИ, 1981. – С. 107-110.
16. Свечарник, Д.В. Линейный электропривод / Д.В. Свечарник. - М.: Энергия, 1979.
17. Свечарник, Д.В. Электрические машины непосредственного привода / Д.В. Свечарник. – М.: Энергоатомиздат, 1988. - 208 с.: ил.
18. Бакиров, Р.И. Первый опыт применения плунжерных насосов с погружным линейным электроприводом в ОАО "НК "РОСНЕФТЬ" / Р.И. Бакиров, М.С. Попов, С.М. Бердин . // Научно-технический вестник ОАО "НК "РОСНЕФТЬ". – М.: Изд-во «Нефтяное хозяйство», 2016. - № 2. – С. 72-75.
19. Ключников, А.Т. Моделирование цилиндрического линейного вентильного двигателя / А. Т. Ключников, А. Д. Коротаев, С. В. Шутемов // Электротехника. – М.: Знак. - 2013. - № 11. - С. 14-17.
20. Цилиндрический линейный вентильный электродвигатель для погружного бесштангового насоса / А. Т. Ключников, А. Д. Коротаев, Н. В. Шулаков, С. В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике : материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 24-25 сентября 2015). - Пермь : Изд-во ПНИПУ, 2015. - С. 158-162.
21. Промышленное использование нетрадиционных технических и технологических решений для нефтедобычи на промыслах Пермского края / Э.Ю. Вдовин, Л.И. Локшин, В.В. Семенов и др.// Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 21–22 апреля 2016). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. – С. 212–222.
22. Шулаков, Н.В. Применение цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобывающих агрегатов / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике и электротехнике: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь 21-22 апреля 2016). – Пермь: Изд-во Перм. нац. исслед. политехн. ун-та, 2016. - С. 161-167.
23. Шулаков, Н.В. Перспективы использования цилиндрического линейного вентильного двигателя в качестве привода плунжерных нефтедобывающих агрегатов / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Фундаментальные исследования. – Пенза: Изд-во Акад. естествознания, 2016. – № 12. – С. 795–799. – 4 т.
24. Шутемов, С.В. Исследование цилиндрического линейного вентильного электродвигателя для погружного бесштангового насоса / С.В. Шутемов // Фундаментальные исследования. – Пенза: Изд-во Акад. естествознания, 2016. – № 12. – С. 800–805. – 4 т.
25. Коротаев, А.Д. Экспериментальные исследования цилиндрического линейного вентильного электродвигателя / А.Д. Коротаев, Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Актуальные проблемы энергосберегающих электротехнологий АПЭЭТ-2014 : сб. тр. междунар. науч.-техн. конф. (Екатеринбург, 17-20 марта 2014). - Екатеринбург : Изд-во УрФУ, 2014. - С. 198-200.
26. Мирзин, А.М. Усилие тяжения цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами между статором и вторичным элементом / А.М. Мирзин, А.Д. Коротаев, С.В. Шутемов // Современные проблемы науки и образования. – Пенза: Изд-во Акад. естествознания, 2013. – № 6.
27. Шулаков, Н.В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе / Н.В. Шулаков, С.В. Шутемов // Электротехника. – М.: Знак, 2014. – № 11. – С. 18–22.
28. Шулаков Н. В. Метод расчета электромагнитных процессов в цилиндрическом линейном вентильном двигателе / Н. В. Шулаков, С. В. Шутемов // Автоматизация в электроэнергетике

и электротехнике: материалы междунар. науч.-техн. конф. (Пермь, 24-25 сентября 2015). - Пермь. - С. 11-12.

29. A.D. Korotaev, A.T. Klyuchnikov, S.A. Lokteev, D.A. Oparin, S.V. Shutemov. A cylindrical linear valve electric motor for the executive mechanism of material application research// 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). 27-30 Oct. 2020., IEEE conference. Ufa, Russia.

30. Чирков Д.А., Коротаев А.Д., Чабанов Е.А. Моделирование цилиндрических линейных вентильных двигателей для различных отраслей промышленности: монография. - Пермь: Изд-во ПНИПУ, 2021. – 130 с.

31. Чабанов Е.А., Коротаев А.Д. Конструкция и технология изготовления цилиндрического линейного вентильного двигателя с постоянными магнитами для электропривода шлифовального станка // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 40.

Осинов К. А., Варюхин А. Н., Овдиенко М. А., Гелиев А. В., Киселев И. О., Козлов А. Л.

ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова»

ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СВЕРХПРОВОДНИКОВ НА ОСНОВЕ ДВУХЖИДКОСТНОЙ МОДЕЛИ ПРИ ПЕРЕМЕННЫХ ТОКАХ

Аннотация: При переменных токах сопротивление сверхпроводника, находящегося при температуре ниже критической, отлично от нуля. Данный экспериментальный факт можно объяснить, если воспользоваться двухжидкостной моделью сверхпроводника. Согласно этой модели, протекающий ток состоит из сверхпроводящих и нормальных электронов, на которых и происходит диссипация энергии в виде джоулева тепла. В работе рассмотрены переходные процессы в сверхпроводниках, протекающие при замыкании ключа в электрической цепи при постоянном токе, а также процессы при синусоидальном изменении электродвижущей силы (ЭДС) источника тока. Получены изменения нормального и сверхпроводящего токов с течением времени, зависимость электрического поля в сверхпроводниках при переменных условиях от внешней частоты ЭДС источника тока. Для этих целей введена эквивалентная электрическая схема сверхпроводников на основе двухжидкостной модели при переменных токах. При этом впервые введены эффективные инерционные индуктивности для сверхпроводящих и нормальных электронов, характеризующих динамику ускорения различных сортов электронов вследствие возбуждения электрических полей при переменных условиях. Получены зависимости амплитуд нормального и сверхпроводящего токов от частоты ЭДС источника тока и температуры сверхпроводника.

Ключевые слова: сверхпроводимость, ВТСП, двухжидкостная модель, нормальные электроны, сверхпроводящие электроны, переменный ток, эквивалентная электрическая схема, инерционные индуктивности для сверхпроводящих и нормальных электронов.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сверхпроводник является таковым в своем смысле слова только в узком диапазоне режимов и внешних условий. При температурах ниже критической

$T < T_c$ сверхпроводящий материал находится в сверхпроводящем состоянии и на постоянном токе не испытывает никакого сопротивления. Однако следует заметить, что при наличии внешнего магнитного поля $H > H_{c1}$ в сверхпроводник II рода проникают кванты магнитного потока, так называемые вихри Абрикосова [1], и при протекании постоянного транспортного тока с плотностью $j_{tr} > j_c$ в режиме течения потока (flux flow) в сверхпроводнике возникает дрейф вихревой решетки [2-4], при котором в вихрях за счет изменения магнитного потока индуцируется вихревое электрическое поле, которое приводит в движение нормальные электроны в вихрях, на которых и происходит диссипация энергии. Поэтому даже на постоянном токе при наличии внешнего магнитного поля ($H_{c1} < H < H_{c2}$) при отсутствии центров пиннинга возникает сопротивление в сверхпроводнике. В настоящей работе на данном этапе не рассматриваются различные эффекты, связанные с наличием внешнего магнитного поля.

При переменном токе в сверхпроводнике сопротивление также отлично от нуля, и с ростом амплитуды транспортного тока и температуры сверхпроводника оно только нарастает. Следует отметить, что под транспортным током понимается тот суммарный ток, который заводится в рассматриваемую электрическую цепь.

Данные факты, вытекающие из различных экспериментальных данных, можно понять в рамках двухжидкостной модели сверхпроводника [2]. Согласно этой модели, весь объем сверхпроводника заполнен двумя жидкостями, состоящими из нормальных и сверхпроводящих электронов соответственно. При различных переходных процессах в сверхпроводнике возникает электрическое поле, которое зависит от частоты изменения тока и различных макроскопических параметров электрической цепи. Это электрическое поле ускоряет два типа жидкостей из нормальных и сверхпроводящих электронов соответственно. Сверхпроводящие электроны не рассеивают энергию за счет объединения в куперовские пары (поскольку данное состояние является более энергетически выгодным), согласно одному из возможных механизмов

возникновения сверхпроводящего состояния, а нормальные электроны испытывают рассеяние на неоднородностях кристаллической решетки. В результате возникают электрическое сопротивление и выделение энергии в виде джоулева тепла.

Для того, чтобы описать вышеописанные протекающие процессы и прояснить основные физические идеи, необходимо ввести эквивалентную электрическую схему сверхпроводников при переменных токах, которая бы соответствовала двухжидкостной модели, что непосредственно и сделано в данной работе. В дальнейшем основа предложенной эквивалентной схемы сверхпроводников будет также применяться для анализа более сложных протекающих процессов в сверхпроводниках при различных внешних условиях, например, при постоянном и переменном транспортных токах, в отсутствие или наличии внешнего магнитного поля, с учетом добавления в сверхпроводящий материал так называемых центров пиннинга для локализации вихрей Абрикосова и другие эффекты посредством добавления соответствующих элементов и параметров электрической цепи в эквивалентную электрическую схему. Более того, без рассмотрения данной эквивалентной схемы и введения инерционных индуктивностей для нормальных и сверхпроводящих электронов невозможно корректно описывать вольт-амперные характеристики (ВАХ) сверхпроводников и тепловыделение в единице объема при переменных условиях из первых физических принципов. В этом смысле данная работа является существенным заданием для дальнейших оценок ВАХ и тепловыделения в сверхпроводниках при переменных условиях, опираясь на фундаментальные уравнения, описывающие процессы, протекающие в сверхпроводниках.

II. ЭКВИВАЛЕНТНАЯ ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СХЕМА СВЕРХПРОВОДНИКОВ. ПЕРЕХОДНОЙ ПРОЦЕСС ПРИ ЗАМЫКАНИИ КЛЮЧА НА ПОСТОЯННОМ ТОКЕ

Как уже было отмечено, при переменных условиях сопротивление сверхпроводника отлично от нуля. Для того, чтобы учесть динамику ускорения

нормальных и сверхпроводящих электронов в эквивалентной электрической схеме необходимо ввести две отдельные ветви для нормального и сверхпроводящего токов, и при этом ввести некоторые макроскопические параметры, которые будут определять инерционные характеристики тех или иных электронов при наводящихся электрических полях в сверхпроводнике при переменных условиях.

Введем так называемые инерционные индуктивности для нормальных и сверхпроводящих электронов – L_n и L_s соответственно (рис. 1). При движении сверхпроводящих электронов потери энергии отсутствуют, поэтому нет необходимости вводить эффективное сопротивление в ветви для сверхпроводящего тока. На нормальных электронах происходит рассеяние энергии, как в стандартных проводниках, и соответственно для них справедлив обычный дифференциальный закон Ома, поэтому в электрической схеме необходимо ввести элемент, который будет описывать диссипацию энергии на нормальных электронах, т.е. некоторое сопротивление R_n (рис. 1). В дальнейшем необходимо будет определить введенные макроскопические параметры L_n , L_s и R_n , используя микроскопические уравнения для нормального и сверхпроводящего токов.

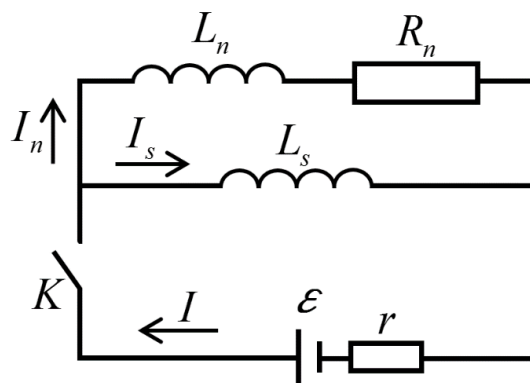


Рис. 1. Эквивалентная электрическая схема сверхпроводников на основе двухжидкостной модели при постоянном токе при замыкании ключа K

Для начала рассмотрим случай, когда образец сверхпроводника подключен к источнику постоянного тока с некоторой электродвижущей силой (ЭДС) источника тока \mathcal{E} и внутренним сопротивлением r . Согласно законам

Кирхгофа, запишем уравнения для токов и напряжений для двух различных замкнутых контуров

$$\begin{cases} I(t) = I_n(t) + I_s(t) \\ \varepsilon - L_s \dot{I}_s(t) = I(t)r \\ \varepsilon - L_n \dot{I}_n(t) = I_n(t)R_n + Ir \end{cases} \quad (1)$$

Если не учитывать переходные процессы, протекающие в эквивалентной электрической цепи, то для начала можно просто рассмотреть установившееся состояние, т.е. все производные по времени по сверхпроводящему и нормальному токам будут равны нулю. В результате (1) будет эквивалентно следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \varepsilon = (I_n + I_s)r \\ \varepsilon = I_n R_n + (I_n + I_s)r \end{cases} \quad (2)$$

Вычитая из второго уравнения в (2) первое, получим, что независимо от того, какое сопротивление R_n , конечный ток, протекающий через нормальную фазу I_n , равен нулю. Таким образом, весь ток пойдет по пути наименьшего сопротивления, т.е. через сверхпроводящую фазу и будет равен $I_s = \varepsilon / r$.

Рассмотрим полную задачу (1) с учетом всех переходных процессов в электрической цепи и исследуем различные характеристики. Из первого и второго уравнений системы (1) выразим нормальный ток в переходном процессе:

$$I_n(t) = \frac{1}{r}(\varepsilon - L_s \dot{I}_s(t) - I_s(t)r) \quad (3)$$

Подставив нормальный ток (3) в третье уравнение системы (1), получим следующее уравнение:

$$\frac{L_s L_n}{r} \ddot{I}_s + \left(L_n + \frac{(R_n + r)}{r} L_s \right) \dot{I}_s + R_n I_s = \frac{R_n}{r} \varepsilon \quad (4)$$

Разделив на $L_s L_n / r$ вышеприведенное уравнение, получим классическое колебательное уравнение для сверхпроводящего тока:

$$\ddot{I}_s + \frac{r}{L_s L_n} \left(L_n + \frac{R_n + r}{r} L_s \right) \dot{I}_s + \frac{r R_n}{L_s L_n} I_s = \frac{R_n}{L_s L_n} \varepsilon \quad (5)$$

В (5) введем следующие обозначения:

$$2\gamma \equiv \frac{r}{L_s L_n} \left(L_n + \frac{R_n + r}{r} L_s \right), \omega_0^2 \equiv \frac{r R_n}{L_s L_n}, X \equiv \frac{R_n}{L_s L_n} \varepsilon \quad (6)$$

где γ , ω_0 , X – коэффициент затухания, собственная частота колебательного процесса и эффективная внешняя сила соответственно. В результате получим дифференциальное уравнение второго порядка для сверхпроводящего тока с эффективной внешней силой в правой части уравнения:

$$\ddot{I}_s + 2\gamma \dot{I}_s + \omega_0^2 I_s = X \quad (7)$$

Поскольку на данном этапе неизвестны характерные величины в уравнении – собственная частота и коэффициент затухания, необходимо рассмотреть решения как с колебательным, так и апериодическим переходным процессом. Для начала рассмотрим колебательный переходный процесс, т.е. случай, когда $\omega_0^2 - \gamma^2 > 0$. Общее решение неоднородного дифференциального уравнения с постоянными коэффициентами (7) записывается в следующем виде:

$$I_s(t) = \frac{X}{\omega_0^2} + e^{-\gamma t} (C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t) \quad (8)$$

В начальный момент времени будем считать, что сверхпроводящий ток и первая производная от него равны нулю, т.е. $I_s(0) = 0$ и $\dot{I}_s(0) = 0$. Из начальных условий найдем, что константы интегрирования равны $C_1 = -X / \omega_0^2$, $C_2 = -\gamma X / \omega_0^3$. Учитывая, что $X / \omega_0^2 = \varepsilon / r$, тогда сверхпроводящий ток будет равен:

$$I_s(t) = \frac{\varepsilon}{r} \left\{ 1 - e^{-\gamma t} \left(\cos \omega_0 t + \frac{\gamma}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right\} \quad (9)$$

Также зависимость для сверхпроводящего тока (9) можно записать следующим образом:

$$I_s(t) = \frac{\varepsilon}{r} \left\{ 1 - e^{-\gamma t} \sqrt{1 + \left(\frac{\gamma}{\omega_0} \right)^2} \cos(\omega_0 t - \delta) \right\}, \quad (10)$$

где сдвиг фаз равен $\delta = \arctg(\gamma / \omega_0)$. При $t \gg 1/\gamma$ экспоненциальная часть сверхпроводящего тока затухает и стремится к $I_s(t) \rightarrow \varepsilon / r$.

Определим как изменяется нормальный ток $I_n(t)$ с течением времени. Вычитая из 2-ого уравнения для напряжений 3-ье в системе (1), получим следующее уравнение:

$$-L_n \frac{dI_n(t)}{dt} + L_s \frac{dI_s(t)}{dt} = I_n(t)R_n \quad (11)$$

Подставив полученное решение для зависимости сверхпроводящего тока (9) для случая $\omega_0^2 - \gamma^2 > 0$ в (11) и преобразуя слагаемые, получим неоднородное (с ненулевой правой частью) обыкновенное дифференциальное уравнение первого порядка для нормального тока:

$$L_n \frac{dI_n(t)}{dt} + I_n(t)R_n = L_s \frac{\varepsilon}{r} e^{-\gamma t} \frac{\gamma^2 + \omega_0^2}{\omega_0} \sin \omega_0 t \quad (12)$$

Рассмотрим сначала однородное обыкновенное дифференциальное уравнение с нулевой правой частью (12), т.е. уравнение $L_n \dot{I}_n(t) + I_n(t)R_n = 0$, решением которого будет экспоненциальная функция вида $I_n(t) = C \exp(-R_n t / L_n)$, где C – некоторая константа интегрирования. Решение неоднородного уравнения будем искать методом вариаций произвольной постоянной, т.е. в виде $I_n(t) = C(t) \exp(-R_n t / L_n)$. Подставив в (12) и проведя преобразования, придем к следующему дифференциальному уравнению для $C(t)$:

$$L_n \frac{dC(t)}{dt} e^{-\frac{R_n t}{L_n}} = L_s \frac{\varepsilon}{r} e^{-\gamma t} \frac{\gamma^2 + \omega_0^2}{\omega_0} \sin \omega_0 t \quad (13)$$

Тогда функция $C(t)$ будет определяться из интеграла вида:

$$C(t) = \int \frac{L_s}{L_n} \frac{\varepsilon}{r} \frac{(\gamma^2 + \omega_0^2)}{\omega_0} e^{-\left(\gamma - \frac{R_n}{L_n}\right)t} \sin \omega_0 t dt \quad (14)$$

Для упрощения дальнейших выкладок введем обозначения:

$$A = \frac{L_s}{L_n} \frac{\varepsilon}{r} \frac{(\gamma^2 + \omega_0^2)}{\omega_0}, \quad \alpha = \gamma - \frac{R_n}{L_n} \quad (15)$$

Тогда (14) сведется к следующему виду:

$$C(t) = A \int e^{-\alpha t} \sin \omega_0 t dt \quad (16)$$

В (16) можно воспользоваться формулой Эйлера $\sin \omega_0 t = (e^{i\omega_0 t} - e^{-i\omega_0 t}) / 2i$, тогда

$$C(t) = \frac{A}{2i} \int \{ e^{(-\alpha + i\omega_0)t} - e^{(-\alpha - i\omega_0)t} \} dt =$$

$$= \frac{A}{2i} \left\{ \frac{1}{-\alpha + i\omega_0} e^{(-\alpha + i\omega_0)t} + \frac{1}{\alpha + i\omega_0} e^{(-\alpha - i\omega_0)t} \right\} + \text{const} \quad (17)$$

Проведя математические преобразования в (17), получим

$$C(t) = -\frac{Ae^{-\alpha t}}{(\alpha^2 + \omega_0^2)} \{ \omega_0 \cos \omega_0 t + \alpha \sin \omega_0 t \} + \text{const} \quad (18)$$

Подставим (18) в выражение для нормального тока:

$$I_n(t) = C_0 e^{-\frac{R_n t}{L_n}} - e^{-\gamma t} \frac{L_s}{L_n} \frac{\varepsilon / r}{\omega_0} \frac{(\gamma^2 + \omega_0^2)}{(\alpha^2 + \omega_0^2)} \{ \omega_0 \cos \omega_0 t + \alpha \sin \omega_0 t \} \quad (19)$$

Удовлетворив начальному условию $I_n(0) = 0$, найдем константу интегрирования C_0 :

$$C_0 = \frac{L_s}{L_n} \frac{\varepsilon}{r} \frac{(\gamma^2 + \omega_0^2)}{(\alpha^2 + \omega_0^2)} \quad (20)$$

Подставив (20) в (19), получим зависимость тока, протекающего через нормальную фазу сверхпроводника, от времени:

$$I_n(t) = \frac{L_s}{L_n} \frac{\varepsilon}{r} \frac{(\gamma^2 + \omega_0^2)}{(\alpha^2 + \omega_0^2)} \left\{ e^{-\frac{R_n t}{L_n}} - e^{-\gamma t} \left(\cos \omega_0 t + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right\} \quad (21)$$

Из (21) видно, что нормальный ток экспоненциально затухает с течением времени. Полный ток, протекающий в электрической цепи, будет равен сумме сверхпроводящего (9) и нормального (21) токов:

$$I(t) = I_s(t) + I_n(t) = \frac{\varepsilon}{r} \left\{ 1 - e^{-\gamma t} \left(\cos \omega_0 t + \frac{\gamma}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right\} + \frac{L_s}{L_n} \frac{\varepsilon}{r} \frac{(\gamma^2 + \omega_0^2)}{(\alpha^2 + \omega_0^2)} \left\{ e^{-\frac{R_n t}{L_n}} - e^{-\gamma t} \left(\cos \omega_0 t + \frac{\alpha}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right\} \quad (22)$$

Очевидно, что с течением времени полный ток $I(t)$ будет стремиться к постоянной величине $I(t) \rightarrow \varepsilon / r$ и будет протекать через сверхпроводящую фазу.

Из (6), (9), (21) и (22) можно определить характерные времена, определяющие время выхода на стационарный режим: $\frac{L_n}{R_n}$ и $\frac{1}{\gamma} = \frac{2}{r / L_s + r / L_n + R_n / L_n}$.

До этого был рассмотрен случай, когда $\omega_0^2 - \gamma^2 > 0$. Для аperiодического переходного процесса (при $\omega_0^2 - \gamma^2 < 0$) аналогичным образом проведя

соответствующие математические выкладки, в конечном итоге получим следующую зависимость для сверхпроводящего тока:

$$I_s(t) = \frac{\varepsilon}{r} \left(1 + \frac{(\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2})}{2\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} e^{-(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2})t} - \frac{(\gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2})}{2\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} e^{-(\gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2})t} \right) \quad (23)$$

Используя (11) и (23), можно получить уравнение для нормального тока для аperiodического переходного процесса:

$$L_n \frac{dI_n}{dt} + I_n R_n = \frac{L_n \varepsilon \omega_0^2}{r \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}} e^{-\gamma t} \operatorname{sh}(\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} t),$$

решением которого является следующая зависимость для нормального тока

$$I_n(t) = \frac{L_s \varepsilon}{L_n r} \frac{\omega_0^2 \alpha}{\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} (\alpha^2 - \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2})} e^{-\frac{R_n}{L_n} t} \left\{ 1 - e^{-\alpha t} \left(\operatorname{sh} \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} t + \frac{\sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}}{\alpha} \operatorname{ch} \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2} t \right) \right\}, \quad (24)$$

где константа α определяется выражением (15).

III. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ В СВЕРХПРОВОДНИКЕ, ДЕЙСТВУЮЩЕЕ НА НОРМАЛЬНЫЕ И СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ ЭЛЕКТРОНЫ

Для колебательного переходного процесса (случай $\omega_0^2 - \gamma^2 > 0$) получим выражение для электрического поля в сверхпроводнике E_s , ускоряющего сверхпроводящие электроны. Для того, чтобы показать основные физические процессы, протекающие в сверхпроводниках, на переменных токах, и не затенять идеи, заложенные в эквивалентной электрической схеме на основе двухжидкостной модели, на данном этапе не будут рассматриваться вопросы, связанные с распределением сверхпроводящего тока по сечению ленты (тем более при переменных условиях).

По определению сверхпроводящий ток можно записать как произведение плотности тока на поперечное сечение сверхпроводника, т.е. $I_s(t) = j_s(t) \Delta S$,

где ΔS – площадь поперечного сечения сверхпроводящей ленты, а плотность тока запишем через произведение концентрации n_s , заряда и скорости сверхпроводящих электронов: $\vec{j}_s(t) = -n_s e \vec{V}_s(t)$. Используя (9), получим выражение для скорости сверхпроводящих электронов $V_s(t)$:

$$V_s(t) = -\frac{\varepsilon}{r} \frac{1}{(n_s e \Delta S)} \left\{ 1 - e^{-\gamma t} \left(\cos \omega_0 t + \frac{\gamma}{\omega_0} \sin \omega_0 t \right) \right\} \quad (25)$$

Следует отметить, что под n_s и e понимаются концентрация и заряд сверхпроводящих электронов соответственно, а не куперовских пар. Если под зарядом понимать заряд пары $2e$, а под n_s концентрацию куперовских пар, которых в два раза меньше по сравнению с общим количеством сверхпроводящих электронов, то в любом случае плотность сверхпроводящего тока, которая определяется как произведение соответствующих величин $\vec{j}_s(t) = -n_s e \vec{V}_s(t)$, останется такой же.

Запишем уравнение для сверхпроводящих электронов (или так называемое первое уравнение Лондонов):

$$m_s \frac{d\vec{V}_s(t)}{dt} = -e \vec{E}_s(t), \quad (26)$$

где m_s – эффективная масса сверхпроводящих электронов. Зная скорость сверхпроводящих электронов из (25), можно найти как изменяется электрическое поле E_s с течением времени:

$$\vec{E}_s(t) = -\frac{m_s}{e} \frac{d\vec{V}_s(t)}{dt} \quad (27)$$

Продифференцировав скорость сверхпроводящих электронов по времени (25), и подставив в (26), получим функциональную зависимость электрического поля от времени для колебательного переходного процесса (случая $\omega_0^2 - \gamma^2 > 0$):

$$E_s(t) = \frac{\varepsilon}{r} \frac{1}{(n_s e^2 / m_s) \Delta S} \frac{\gamma^2 + \omega_0^2}{\omega_0} e^{-\gamma t} \sin \omega_0 t \quad (28)$$

Из (28) видно, что с течением времени электрическое поле экспоненциально затухает, т.е. при временах $\tau \gg 1/\gamma$ электрическое поле $E_s(t) \rightarrow 0$ стремится к нулю. Таким образом, на постоянном токе в установившемся режиме электрическое поле в сверхпроводнике равно нулю, как и должно быть.

В противном случае даже бесконечно малая величина электрического поля приводила бы к бесконечным значениям тока в сверхпроводнике, что противоречило бы всякому физическому смыслу.

Аналогично можно получить действующее электрическое поле для апериодического случая $\omega_0^2 - \gamma^2 < 0$:

$$E_s(t) = -\frac{(\varepsilon / r)\omega_0^2}{2(n_s e^2 / m_s)\Delta S \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}}(e^{-\alpha_1 t} - e^{-\alpha_2 t}), \quad (29)$$

где $\alpha_1 \equiv \gamma - \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}$, $\alpha_2 \equiv \gamma + \sqrt{\gamma^2 - \omega_0^2}$

IV. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ИНЕРЦИОННЫХ ИНДУКТИВНОСТЕЙ ДЛЯ НОРМАЛЬНЫХ И СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ЭЛЕКТРОНОВ В ЭКВИВАЛЕНТНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СХЕМЕ

В результате с помощью эквивалентной электрической схемы сверхпроводника, состоящей из двух ветвей, по которым отдельно протекают нормальные и сверхпроводящие токи, получены различные зависимости – зависимости нормального и сверхпроводящего токов от времени, электрического поля, ускоряющего нормальные и сверхпроводящие электроны. Также получена оценка для характерного времени затухания нормального тока и электрического поля до установления стационарного режима. Однако во всех этих уравнениях присутствуют неизвестные параметры элементов цепи – L_n , R_n , L_s , γ и ω_0 . Для того, чтобы определить недостающие коэффициенты, характеризующие макропараметры системы, необходимо связать их с микроскопическими параметрами, записав уравнения для нормальных и сверхпроводящих электронов. Запишем уравнения движения для нормальных и сверхпроводящих электронов:

$$\begin{cases} m \frac{d\vec{V}_n(t)}{dt} = -\frac{m}{\tau} \vec{V}_n(t) - e\vec{E}_n(t), \\ m_s \frac{d\vec{V}_s(t)}{dt} = -e\vec{E}_s(t) \end{cases} \quad (30)$$

где \vec{V}_n , \vec{V}_s , m и m_s – скорости и эффективные массы нормальных и сверхпроводящих электронов соответственно. В (30) формально разделены электрические поля, действующие отдельно на нормальные и сверхпроводящие

электроны. В дальнейшем безусловно будем считать, что на оба сорта электронов действует единое электрическое поле, которое приводит их в движение.

Умножим первое уравнение в (30) на $(-en_n)$, а второе – на $(-en_s)$, где n_n и n_s – концентрации нормальных и сверхпроводящих электронов, и используем определение плотности соответствующих токов $\vec{j}_n(t) = -en_n\vec{V}_n(t)$, $\vec{j}_s(t) = -en_s\vec{V}_s(t)$, в результате получим следующую систему уравнений:

$$\begin{cases} \tau \frac{d\vec{j}_n(t)}{dt} + \vec{j}_n(t) = \alpha_n \sigma_0 \vec{E}_n(t), \\ \tau \frac{d\vec{j}_s(t)}{dt} = \alpha_s \sigma_0 \left(\frac{m}{m_s} \right) \vec{E}_s(t) \end{cases} \quad (31)$$

где были введены следующие обозначения: $\sigma_0 = ne^2\tau/m$ – удельная электропроводность сверхпроводящего материала, находящегося в нормальном состоянии, $\alpha_s = n_s/n$, $\alpha_n = n_n/n$ – доли сверхпроводящих и нормальных электронов, n – концентрация всех электронов проводимости (сумма сверхпроводящих и нормальных электронов).

Умножим первое уравнение в (31) на $(\Delta S \Delta l / \sigma_0)$, где ΔS – площадь сечения, Δl – длина сверхпроводящей ленты, и учтем, что нормальный ток равен $I_n = j_n \Delta S$:

$$\frac{\tau}{\Delta S} \frac{\Delta l}{\sigma_0} \frac{d\vec{I}_n(t)}{dt} + \vec{I}_n(t) \frac{\Delta l}{\sigma_0 \Delta S} = \alpha_n \Delta l \vec{E}_n(t) \quad (32)$$

Сопоставив (32) с (11), которое было получено для замкнутого контура, охватывающего ветви, по которым протекает сверхпроводящий и нормальный токи, положим, что

$$R_n \equiv \frac{\Delta l}{\sigma_0 \Delta S}, \quad L_n \equiv \frac{\tau}{\Delta S} \frac{\Delta l}{\sigma_0} = \tau R_n \quad (33)$$

В этом случае выражение для R_n полностью согласуется с общеизвестным выражением для сопротивления элемента проводника длиной Δl с площадью поперечного сечения ΔS и удельным сопротивлением $1/\sigma_0$. Если удельная проводимость σ_0 и площадь поперечного сечения ΔS изменяются по длине проводника, то эти выражения необходимо переписать через интегральные соотношения:

$$R_n = \int \frac{dl}{\sigma_0 \Delta S}, L_n = \int \frac{\tau}{\Delta S} \frac{dl}{\sigma_0} \quad (34)$$

Для того, чтобы сопоставляемые уравнения (11) и (32) были полностью согласованы друг с другом, необходимо, чтобы правые части двух соответствующих уравнений были равны друг другу, поэтому запишем:

$$L_s \frac{d\vec{I}_s(t)}{dt} = \alpha_n \Delta l \vec{E}_n(t) \quad (35)$$

Для того, чтобы найти инерционную индуктивность для сверхпроводящих электронов L_s , воспользуемся вторым уравнением в (31), которое по своей сути является модификацией первого уравнения Лондонов для сверхпроводящих электронов, умножив его на площадь поперечного сечения сверхпроводника ΔS , в результате получим следующее уравнение:

$$\tau \frac{d\vec{I}_s(t)}{dt} = \alpha_s \sigma_0 \Delta S \left(\frac{m}{m_s} \right) \vec{E}_s(t) \quad (36)$$

Путем сопоставления (35) и (36) и наложения условия равенства электрических полей, действующих на нормальные и сверхпроводящие электроны $\vec{E}_n(t) = \vec{E}_s(t) \equiv \vec{E}(t)$, получим:

$$L_s \frac{1}{\tau} \sigma_0 \Delta S \left(\frac{m}{m_s} \right) \alpha_s \vec{E}(t) = \alpha_n \vec{E}(t) \Delta l \quad (37)$$

Отсюда получим инерционную индуктивность для сверхпроводящих электронов L_s :

$$L_s = \tau \frac{\alpha_n}{\alpha_s} \frac{1}{\sigma_0 \Delta S} \left(\frac{m_s}{m} \right) \Delta l \quad (38)$$

Для изменяющейся площади поперечного сечения сверхпроводника также запишем выражение (38) в интегральной форме:

$$L_s = \frac{\alpha_n}{\alpha_s} \left(\frac{m_s}{m} \right) \int \frac{\tau dl}{\sigma_0 \Delta S} \quad (39)$$

Отношение эффективных инерционных индуктивностей для сверхпроводящей и нормальной фаз будет зависеть от отношения долей концентраций и эффективных масс сверхпроводящих и нормальных электронов:

$$\frac{L_s}{L_n} = \frac{\alpha_n}{\alpha_s} \left(\frac{m_s}{m} \right) \quad (40)$$

Отметим, что удельная проводимость σ_0 зависит также от времени релаксации τ . Проведем некоторые математические преобразования в выражениях для инерционных индуктивностей L_n и L_s :

$$\begin{aligned} L_n &= \tau R_n = \frac{\tau}{\Delta S} \frac{\Delta l}{\sigma_0} = \frac{\tau \Delta l}{\Delta S} \frac{m}{n e^2 \tau} = \\ &= \frac{m}{n e^2} \frac{\Delta l}{\Delta S} = \frac{m}{4\pi n e^2} 4\pi \frac{\Delta l}{\Delta S} = \frac{4\pi}{\omega_p^2} \frac{\Delta l}{\Delta S} \end{aligned} \quad (41)$$

$$\begin{aligned} L_s &= \frac{\alpha_n}{\alpha_s} \left(\frac{m_s}{m} \right) \tau \frac{\Delta l}{\Delta S} \frac{m}{n e^2 \tau} = \frac{n_n}{n_s} \frac{m_s}{n_s e^2} \frac{\Delta l}{\Delta S} = \\ &= \alpha_n \frac{m_s}{n_s e^2} \frac{\Delta l}{\Delta S} = \alpha_n \frac{4\pi}{\omega_{ps}^2} \frac{\Delta l}{\Delta S}, \end{aligned} \quad (42)$$

где $\omega_p = \sqrt{4\pi n e^2 / m}$ – плазменная (или ленгмюровская) частота для нормальных электронов в сверхпроводнике, которая, как правило, возникает в уравнениях колебаний плазмы при неподвижных ионах при воздействии электрического поля. Аналогичным образом введена плазменная частота и для сверхпроводящих электронов $\omega_{ps} = \sqrt{4\pi n_s e^2 / m_s}$.

Заметим, что согласно (41) и (42) L_n и L_s обратно пропорциональны квадрату соответствующих плазменных частот. При увеличении плазменных частот ω_p и ω_{ps} введенные эффективные индуктивности, характеризующие инерционные свойства различных сортов «жидкостей», будут уменьшаться по величине, что будет соответствовать уменьшению инертных свойств, т.е. уменьшению некоторой «эффективной массы» электронов.

Тогда величину L_n / L_s можно выразить через отношение плазменных частот для нормальных и сверхпроводящих электронов и долю концентраций нормальных электронов:

$$\frac{L_n}{L_s} = \frac{1}{\alpha_n} \frac{\omega_{ps}^2}{\omega_p^2} \quad (43)$$

Преобразуем ранее введенные параметры, входящие в зависимости сверхпроводящего и нормального токов, электрического поля от времени –

собственную частоту колебаний ω_0 , коэффициент затухания γ с помощью полученных соотношений для введенных макроскопических параметров эквивалентной электрической схемы R_n , L_n и L_s согласно (33), (41) и (42).

$$\omega_0^2 = \frac{rR_n}{L_s L_n} = \frac{1}{\tau} \frac{(n_s e^2 / m_s) r \Delta S}{\Delta l} \frac{1}{\alpha_n} = \frac{1}{4\pi} \frac{1}{\tau} \frac{r \Delta S}{\Delta l} \frac{1}{\alpha_n} \omega_{ps}^2 \quad (44)$$

$$2\gamma = \frac{1}{\tau} + \frac{(ne^2 / m) r \Delta S}{\Delta l} + \frac{(n_s e^2 / m_s) r \Delta S}{\Delta l} \frac{1}{\alpha_n} =$$

$$= \frac{1}{\tau} + \frac{1}{4\pi} \frac{r \Delta S}{\Delta l} \left(\omega_p^2 + \frac{1}{\alpha_n} \omega_{ps}^2 \right) \quad (45)$$

где r – внутреннее сопротивление источника тока, ΔS – площадь поперечного сечения сверхпроводника, Δl – длина сверхпроводящей ленты.

Для того, чтобы узнать какой случай рассматривать $\omega_0^2 - \gamma^2 > 0$ или $\omega_0^2 - \gamma^2 < 0$ (с колебательной или с экспоненциально затухающей частью) при решении классических уравнений колебаний для сверхпроводящих и нормальных токов, необходимо оценивать разницу $\omega_0^2 - \gamma^2$ в зависимости от конкретного случая (например, от величин температуры или внутреннего сопротивления источника тока):

$$\omega_0^2 - \gamma^2 = \frac{1}{\tau} \frac{(n_s e^2 / m_s) r \Delta S}{\Delta l} \frac{1}{\alpha_n} -$$

$$- \left(\frac{1}{2\tau} + \frac{(ne^2 / m) r \Delta S}{2\Delta l} + \frac{(n_s e^2 / m_s) r \Delta S}{2\Delta l} \frac{1}{\alpha_n} \right)^2 \quad (46)$$

Также можно оценить добротность $Q = \omega_0 / 2\gamma$ рассматриваемой эквивалентной электрической цепи:

$$Q = \frac{\omega_0}{2\gamma} = \frac{\sqrt{\frac{1}{4\pi} \frac{1}{\tau} \frac{r \Delta S}{\Delta l} \frac{1}{\alpha_n} \omega_{ps}^2}}{\frac{1}{\tau} + \frac{1}{4\pi} \frac{r \Delta S}{\Delta l} \left(\omega_p^2 + \frac{1}{\alpha_n} \omega_{ps}^2 \right)} \quad (47)$$

Следует отметить, что после того, как были определены макроскопические параметры эквивалентной электрической цепи сверхпроводника (инерционные индуктивности L_n , L_s и сопротивление нормальной фазы R_n) и положено, что $\vec{E}_n(t) = \vec{E}_s(t) \equiv \vec{E}(t)$, то можно легко убедиться

в том, что зависимость электрического поля от времени также можно получить из уравнения движения для нормальных электронов:

$$m \frac{d\vec{V}_n}{dt} = -\frac{m}{\tau} \vec{V}_n - e\vec{E}_n \quad (47)$$

Умножив (47) на выражение $(-en_n\tau\Delta S / m)$ и учитывая, что $I_n(t) = \vec{j}_n(t)\Delta\vec{S} = (-en_n\vec{V}_n)\Delta\vec{S}$, получим следующее уравнение:

$$\tau \frac{dI_n(t)}{dt} + I_n(t) = \alpha_n \sigma_0 E_n(t) \Delta S \quad (48)$$

Подставив в (48) зависимость для нормального тока $I_n(t)$ из (21) и проведя соответствующие математические преобразования, получим зависимость электрического поля, действующего на нормальные электроны, от времени. Это электрическое поле $E_n(t)$ будет согласовано с $E_s(t)$, т.е. будет выполнено $E_s(t) = E_n(t) = E(t)$. Таким образом, полученные электрические поля, действующие на сверхпроводящие и нормальные электроны, равны, как и должно быть, что означает, что на электроны действует единое электрическое поле, которое одновременно ускоряет как нормальные, так и сверхпроводящие электроны. Получено, что на постоянном токе это электрическое поле экспоненциально затухает, в противном случае сверхпроводящие электроны создавали бы бесконечный ток, поскольку даже небольшое значение электрического поля ускорило бы сверхпроводящие электроны до бесконечной величины.

V. СЛУЧАЙ ПЕРЕМЕННОЙ ЭЛЕКТРОДВИЖУЩЕЙ СИЛЫ ИСТОЧНИКА ТОКА

Пусть теперь ЭДС источника тока $\varepsilon(t)$ будет меняться периодическим образом как функция $\cos \omega t$ (или в комплексной записи $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$). Реальный физический смысл будет иметь только действительная часть комплексного числа. Эквивалентная схема сверхпроводника в случае переменного ЭДС представлена на рис. 2. Выразим из первых двух уравнений системы (1) нормальный ток:

$$I_n(t) = \frac{1}{r} (\varepsilon - L_s \dot{I}_s(t) - I_s(t)r) \quad (49)$$

Подставив нормальный ток (49) в третье уравнение системы (1) и проведя соответствующие математические выкладки, приходим к обыкновенному дифференциальному уравнению колебаний второго порядка для сверхпроводящего тока для переменного ЭДС источника тока:

$$\ddot{i}_s + \left(\frac{r}{L_s} + \frac{R_n + r}{L_n} \right) \dot{i}_s + \frac{rR_n}{L_n L_s} I_s = \left(\frac{R_n}{L_n L_s} + \frac{\omega}{L_s} i \right) \varepsilon_0 e^{i\omega t} \quad (50)$$

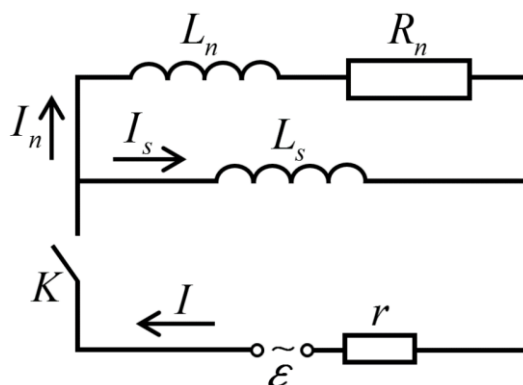


Рис. 2. Эквивалентная электрическая схема сверхпроводника в случае переменной электродвижущей силы источника тока $\varepsilon(t) = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$

Преобразуя слагаемое в комплексной форме в правой части (50) через амплитуду и комплексную экспоненту, получим:

$$\left(\frac{R_n}{L_n L_s} + \frac{\omega}{L_s} i \right) = \frac{1}{L_s} \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{R_n}{L_n} \right)^2} e^{i\varphi}, \quad \varphi = \text{arctg} \left(\frac{\omega L_n}{R_n} \right) \quad (51)$$

В результате приходим к более компактной форме записи (50):

$$\ddot{i}_s(t) + 2\gamma \dot{i}_s(t) + \omega_0^2 I_s(t) = X_{0s} e^{i(\omega t + \varphi)}, \quad (52)$$

где $X_{0s} = (\varepsilon_0 / L_s) \sqrt{\omega^2 + (R_n / L_n)^2}$, $\varphi = \text{arctg}(\omega L_n / R_n)$.

Таким образом, амплитуда «внешней силы» X_{0s} и соответствующий сдвиг фаз φ будут зависеть от частоты изменения внешнего напряжения в электрической цепи –

$$X_{0s} = X_{0s}(\omega), \quad \varphi = \varphi(\omega).$$

Общее решение неоднородного уравнения можно представить в виде суммы общего решения однородного уравнения (с нулевой правой частью) и частного решения неоднородного (с ненулевой правой частью). Тогда сверхпроводящий ток будет зависеть от времени следующим образом:

$$\begin{aligned}
I_s(t) &= \frac{X_{0s}}{\omega_0^2 - \omega^2 + 2\gamma i \omega} e^{i(\omega t + \varphi)} + e^{-\gamma t} (C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t) = \\
&= \frac{X_{0s} (\omega_0^2 - \omega^2 - 2i\gamma\omega)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2} (\cos(\omega t + \varphi) + i \sin(\omega t + \varphi)) + \\
&\quad + e^{-\gamma t} (C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t) \quad (53)
\end{aligned}$$

Удовлетворив начальным условиям задачи $I_s(0) = 0$, $\dot{I}_s(0) = 0$, получим достаточно громоздкое выражение:

$$\begin{aligned}
I_s(t) &= \frac{X_{0s} \{(\omega_0^2 - \omega^2) \cos(\omega t + \varphi) + 2\gamma\omega \sin(\omega t + \varphi)\}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2} + \\
&\quad + e^{-\gamma t} \left\{ -\frac{X_{0s} ((\omega_0^2 - \omega^2) \cos \varphi + 2\gamma\omega \sin \varphi)}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2} \cos \omega_0 t + \right. \\
&\quad \left. + \frac{X_{0s} [(\omega(\omega_0^2 - \omega^2) - 2\omega\gamma^2) \sin \varphi - (2\gamma\omega^2 + \gamma(\omega_0^2 - \omega^2)) \cos \varphi]}{\omega [(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2]} \sin \omega_0 t \right\} \quad (54)
\end{aligned}$$

Видно, что второе слагаемое в (54) экспоненциально затухает с течением времени, и при $t \gg 1/\gamma$ сверхпроводящий ток стремится к выражению вида:

$$I_s(t) = \frac{X_{0s} \{(\omega_0^2 - \omega^2) \cos(\omega t + \varphi) + 2\gamma\omega \sin(\omega t + \varphi)\}}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2} \quad (55)$$

Преобразуя зависимость в фигурных скобках в (55) и перейдя к функции косинуса с дополнительным сдвигом фаз, получим:

$$I_s(t) = \frac{\varepsilon_0}{L_s} \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{R_n}{L_n}\right)^2} \frac{\cos(\omega t + \varphi - \delta)}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}}, \quad (56)$$

где сдвиги фаз соответственно выражаются следующим образом: $\operatorname{tg} \delta = 2\gamma\omega / (\omega_0^2 - \omega^2)$, $\varphi(\omega) = \operatorname{arctg}(\omega L_n / R_n)$.

Амплитуда сверхпроводящего тока является функцией частоты (57) и на определенной частоте должен достигаться резонанс сверхпроводящего тока.

$$I_{s0} = \frac{\varepsilon_0}{L_s} \sqrt{\frac{\omega^2 + (R_n / L_n)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}} \quad (57)$$

Взяв производную по частоте от подкоренного выражения и приравняв ее к нулю, получим частоту, при которой сверхпроводящий ток I_{s0} имеет резонанс:

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \frac{\omega^2 + (R_n / L_n)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2} \right\} = 0, \quad (58)$$

квадрат резонансной частоты ω_{res}^2 при этом равен:

$$\omega_{res}^2 = -\left(\frac{R_n}{L_n}\right)^2 + \sqrt{\left(\frac{R_n}{L_n}\right)^4 + \omega_0^4 + 2\left(\frac{R_n}{L_n}\right)^2 \omega_0^2 - \left(\frac{2\gamma R_n}{L_n}\right)^2} \quad (59)$$

Теперь найдем зависимость нормального тока в сверхпроводнике от времени в случае переменного ЭДС $\varepsilon = \varepsilon_0 e^{i\omega t}$.

Из первого и третьего уравнений системы (1) найдем сверхпроводящий ток $I_s(t) = \frac{1}{r}(\varepsilon - L_n \dot{I}_n - I_n(R_n + r))$. Подставив сверхпроводящий ток $I_s(t)$ во второе уравнение системы (1) и проведя соответствующие математические преобразования, получим уравнение для нормального тока:

$$\ddot{I}_n + \left(\frac{R_n + r}{L_n} + \frac{r}{L_s}\right) \dot{I}_n + \frac{rR_n}{L_s L_n} I_n = \frac{\omega \varepsilon_0}{L_n} e^{i(\omega t + \pi/2)} \quad (60)$$

Используя обозначения, принятые в (6), запишем (60) в виде:

$$\ddot{I}_n + 2\gamma \dot{I}_n + \omega_0^2 I_n = X_{0n} e^{i(\omega t + \pi/2)}, \quad (61)$$

где $X_{0n} = \omega \varepsilon_0 / L_n$. Решая обыкновенное дифференциальное уравнение второго порядка с постоянными коэффициентами (60) и удовлетворив нулевым начальным условиям для нормального тока I_n и его первой производной \dot{I}_n ($I_n(0) = 0$ и $\dot{I}_n(0) = 0$), получим:

$$I_n(t) = -\frac{X_{0n}(\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2} + \frac{X_{0n} 2\omega\gamma \cos \omega t}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2} + e^{-\gamma t} (C_1 \cos \omega_0 t + C_2 \sin \omega_0 t), \quad (62)$$

где константы C_1 и C_2 равны

$$C_1 = \frac{-X_{0n} 2\omega\gamma}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2}, C_2 = \frac{X_{0n} \omega (\omega_0^2 - \omega^2 - 2\gamma^2)}{\omega_0 ((\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2)} \quad (63)$$

При $t \gg 1/\gamma$ правая часть в (62) уничтожается, и нормальный ток будет равен:

$$I_n(t) = \frac{-X_{0n}(\omega_0^2 - \omega^2) \sin \omega t}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2} + \frac{X_{0n} 2\omega\gamma \cos \omega t}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2} \quad (64)$$

Сведем (64) к следующему виду:

$$I_n(t) = \frac{X_{0n}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2}} \cos(\omega t - \delta), \quad (65)$$

где $\text{tg } \delta = -(\omega_0^2 - \omega^2) / 2\omega\gamma$. Амплитуда тока, протекающего через нормальную фазу, равна

$$I_{n0} = \frac{X_{0n}}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2}} = \frac{\omega\varepsilon_0}{L_n} \frac{1}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2}} \quad (66)$$

Таким образом, используя выражения (57) и (66), получим отношение амплитуд сверхпроводящего и нормального токов при $t \gg 1/\gamma$:

$$\frac{I_{s0}}{I_{n0}} = \frac{L_n}{L_s \omega} \sqrt{\omega^2 + \left(\frac{R_n}{L_n}\right)^2} = \frac{L_n}{L_s} \sqrt{1 + \left(\frac{R_n}{\omega L_n}\right)^2} \quad (67)$$

Если учесть (41) и (42), то отношение амплитуд можно выразить через доли концентраций и эффективные массы сверхпроводящих и нормальных электронов:

$$\frac{I_{s0}}{I_{n0}} = \frac{\alpha_s}{\alpha_n} \left(\frac{m}{m_s}\right) \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau}\right)^2} \quad (68)$$

Можно рассмотреть различные предельные случаи выражения (68). При малых параметрах $\nu \equiv \omega\tau \ll 1$ отношение амплитуд токов будет примерно равно $\frac{I_{s0}}{I_{n0}} \approx \frac{\alpha_s}{\alpha_n} \left(\frac{m}{m_s}\right) \frac{1}{\omega\tau}$, в случае больших значений $\nu = \omega\tau \gg 1$ получим $\frac{I_{s0}}{I_{n0}} \approx \frac{\alpha_s}{\alpha_n} \left(\frac{m}{m_s}\right)$, т.е. в этом случае зависимость от частоты пропадает, и отношение амплитуд токов сверхпроводящей и нормальной фазы равно постоянной величине.

Также можно оценить влияние температуры на отношение амплитуд, поскольку концентрации сверхпроводящих и нормальных электронов являются функциями температуры. Известно, что зависимость критического поля H_c от температуры хорошо аппроксимируется следующей эмпирической зависимостью [2]:

$$H_c(T) = H_c(0) \left(1 - \left(\frac{T}{T_c}\right)^2\right) \quad (69)$$

Глубина проникновения магнитного поля λ в сверхпроводник во всем диапазоне температур аппроксимируется следующей зависимостью:

$$\lambda^2(T) = \lambda_L^2 / (1 - (T/T_c)^4), \quad (70)$$

где λ_L – лондоновская глубина проникновения. Из уравнения Лондонов [3] следует, что глубина проникновения магнитного поля λ_L равна

$$\lambda_L^2 = \frac{mc^2}{4\pi ne^2}, \quad (71)$$

где n – полная концентрация электронов проводимости.

Доли концентраций сверхпроводящих и нормальных электронов определяются как $\alpha_s = n_s / n$, $\alpha_n = n_n / n$. Очевидно, что сумма долей концентраций равна единице $\alpha_s + \alpha_n = 1$. Отсюда, используя (69) и (70) легко получить зависимость концентраций сверхпроводящих и нормальных электронов от температуры:

$$n_s(T) = n \left(1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \right), \quad n_n = n \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \quad (72)$$

Тогда доли концентраций α_s и α_n будут зависеть от температуры аналогичным образом:

$$\alpha_s(T) = 1 - \left(\frac{T}{T_c} \right)^4, \quad \alpha_n = \left(\frac{T}{T_c} \right)^4 \quad (73)$$

В итоге отношение амплитуд токов разных фаз зависит от температуры как

$$\frac{I_{s0}}{I_{n0}} = \frac{1 - (T/T_c)^4}{(T/T_c)^4} \left(\frac{m}{m_s} \right) \sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau} \right)^2} \quad (74)$$

Чем отношение I_{s0} / I_{n0} будет меньше, тем выделение энергии в виде джоулева тепла будет больше вследствие рассеяния энергии на примесях, дефектах кристаллической решетки и тепловых фононах при движении нормальных электронов.

Вычислим тепловыделение за счет возбуждения нормальной фазы переменным ЭДС источника тока $\varepsilon = \varepsilon_0 \cos \omega t$. Из физических соображений ясно, что напряжение ε представляет собой работу, которую совершает источник тока за время dt , на единицу протекшего заряда dq , т.е. $\varepsilon = \delta A / dq$. Тогда средняя мощность источника тока будет определяться как полная работа в единицу времени:

$$\langle \dot{Q} \rangle = \left\langle \varepsilon \frac{dq_n}{dt} \right\rangle = \langle \varepsilon I_n \rangle \quad (75)$$

Введем комплексные выражения для напряжения $\hat{\varepsilon}$ и нормального тока \hat{I}_n тогда можно соответствующие действительные величины выразить следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{1}{2}(\hat{\varepsilon} + \hat{\varepsilon}^*), \quad I_n = \frac{1}{2}(\hat{I}_n + \hat{I}_n^*), \quad (76)$$

где $\hat{\varepsilon}^*$, \hat{I}_n^* комплексно сопряженные с $\hat{\varepsilon}$, \hat{I}_n . Подставив (76) в (75) и проведя математические преобразования, получим:

$$\begin{aligned} \langle \dot{Q} \rangle &= \langle \varepsilon I_n \rangle = \frac{1}{4} \langle (\hat{\varepsilon} + \hat{\varepsilon}^*)(\hat{I}_n + \hat{I}_n^*) \rangle = \\ &= \frac{1}{2} \varepsilon_0 I_{n0} \cos \delta + \frac{1}{2} \varepsilon_0 I_{n0} \langle \cos(2\omega t - \delta) \rangle = \frac{1}{2} \varepsilon_0 I_{n0} \cos \delta \end{aligned} \quad (77)$$

Тогда подставив (66) и сдвиг фаз δ в (77), получим

$$\langle \dot{Q} \rangle = \frac{1}{2} \frac{\omega \varepsilon_0^2 / L_n}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2}} \cos \left(\arctg \left(-\frac{\omega_0^2 - \omega^2}{2\omega\gamma} \right) \right) \quad (78)$$

Воспользовавшись тригонометрической формулой $\cos(\arctg x) = 1/\sqrt{1+x^2}$, преобразуем (78) к виду:

$$\langle \dot{Q} \rangle = \frac{\gamma \omega^2 \varepsilon_0^2 / L_n}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2}, \quad (79)$$

где $\langle \dot{Q} \rangle$ – средняя мощность источника тока. Видно, что мощность является функцией частоты. Оценим частоту, при которой достигается резонанс мощности. Для этого продифференцируем (79) по частоте:

$$\frac{d}{d\omega} \left\{ \frac{\omega^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\omega\gamma)^2} \right\} = 0 \quad (80)$$

Продифференцировав, получим, что резонанс мощности источника тока за счет возбуждения нормальной фазы достигается при внешней частоте равной частоте собственных колебаний, т.е. при $\omega_{res} = \omega_0$. При этом максимальная мощность источника тока равна

$$\langle \dot{Q}_{max} \rangle = \frac{1}{4} \frac{\varepsilon_0^2}{\gamma L_n} \quad (81)$$

Вычислим электрическое поле, действующее на нормальные и сверхпроводящие электроны в сверхпроводнике, при переменном напряжении источника тока. Полученное электрическое поле в дальнейшем будет

использоваться при разработке математических моделей по предсказанию тепловыделения, вольт-амперных характеристик в сверхпроводнике при переменном электрическом поле при наличии внешнего магнитного поля как с пиннингом, так и без пиннинга, т.е. с учетом дрейфа вихрей Абрикосова.

Сверхпроводящий ток при $t \gg 1/\gamma$ зависит от времени и частоты следующим образом:

$$I_s(t) = \frac{\varepsilon_0}{L_s} \sqrt{\frac{\omega^2 + (1/\tau)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}} e^{i(\omega t + \varphi - \delta)}, \quad (82)$$

где $\varphi(\omega) = \arctg \omega\tau$, $\delta(\omega) = \arctg\left(\frac{2\gamma\omega}{\omega_0^2 - \omega^2}\right)$.

Электрическое поле найдем через производную по времени от сверхпроводящего тока, используя (35), (42) и (82):

$$E(t) = \frac{L_s}{\alpha_n \Delta l} \frac{dI_s(t)}{dt} = \frac{i\omega\varepsilon_0}{\alpha_n \Delta l} \sqrt{\frac{\omega^2 + (1/\tau)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}} e^{i(\omega t + \varphi - \delta)} \quad (83)$$

Учтем $i = e^{i\pi/2}$, тогда получим:

$$E(\omega, t) = \frac{1}{\alpha_n} \frac{\varepsilon_0}{\Delta l} \omega \sqrt{\frac{\omega^2 + (1/\tau)^2}{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + (2\gamma\omega)^2}} e^{i(\omega t + \varphi - \delta + \pi/2)} \quad (84)$$

Из (84) видно, что в случае постоянного напряжения источника тока, т.е. при нулевой частоте ($\omega=0$), электрическое поле в сверхпроводнике, являющееся сложной функцией частоты, равно нулю, как и должно быть на постоянном токе. Зависимость для электрического поля как в (84) также можно получить из соответствующих уравнений, используя ток, протекающий через нормальную фазу сверхпроводника.

VI. ВЫВОДЫ

В работе представлена эквивалентная электрическая схема сверхпроводников в соответствии с двухжидкостной моделью как на переменном, так и на постоянном токах с учетом переходного процесса при замыкании (или размыкании) ключа в электрической цепи. Согласно двухжидкостной модели сверхпроводники содержат два сорта электронов – нормальных и сверхпроводящих. При возбуждении нормальных электронов

происходит диссипация энергии в виде джоулева тепла. Часть электронов проводимости объединяются в так называемые «куперовские пары». В силу того, что это состояние более энергетически выгодное, то в этом случае при движении куперовских пар не происходит рассеяние энергии. Следует отметить, что сверхпроводящее состояние также возможно и вследствие других физических причин и особенностей тех или иных материалов.

Впервые введены некоторые макроскопические параметры в ветвях для нормального и сверхпроводящего токов – инерционные индуктивности L_n и L_s для нормальных и сверхпроводящих электронов соответственно. Основной физической смысл введенных инерционных индуктивностей заключается в том, что они отражают динамику ускорения двух типов электронов под действием переменных электрических полей в толще сверхпроводника.

Также эти параметры L_n и L_s были определены путем сопоставления макроскопических уравнений для всей электрической цепи с микроскопическими уравнениями движения нормальных и сверхпроводящих электронов. Получено, что инерционные индуктивности L_n и L_s определяются долями концентраций нормальных и сверхпроводящих электронов, а также от соответствующих плазменных (или так называемых ленгмюровских) частот.

Такой подход позволяет определять зависимости сверхпроводящих и нормальных токов, а также электрических полей от времени, частоты, температуры и других параметров рассматриваемой электрической цепи. Зная токи и электрические поля, можно оценивать тепловыделение в объеме сверхпроводника при возбуждении нормальных электронов на переменном токе. Также можно оценивать влияние температуры и частоты переменного тока на тепловыделение.

Предложенный подход для анализа нестационарных процессов в сверхпроводниках на переменном токе является существенным заделом для построения математических моделей по предсказанию вольт-амперных характеристик и тепловыделения при переменных условиях (переменных токах и магнитных полях) при соответствующей доработке математической модели и

рассмотрении различных протекающих процессов в сверхпроводниках II рода, в том числе проникание квантов магнитного потока в виде вихрей Абрикосова при наличии внешних магнитных полей, дрейф вихревой решетки при наличии транспортного тока, пиннинг вихрей и многие другие эффекты.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Абрикосов А.А. Основы теории металлов / А.А. Абрикосов. – М.: Наука, 1987. – 600 с.;
2. Ципенюк Ю.М. Физические основы сверхпроводимости: Учебное пособие: Для вузов. – М.: Изд-во МФТИ, 2002. – 160 с.;
3. Шмидт В.В. Введение в физику сверхпроводников / В.В. Шмидт. – М. : МЦНМО, 2000. – 402 с.;
4. Мейлихов Е.З. Магнетизм. Основы теории: Учебное пособие. Долгопрудный: Интеллект, 2014. – 184 с.

Жеребцов А. А., Юшкова О. А., Саяхов И. Ф., Зиннатуллина Г. С., Гарипов И. Р., Пронин Е. А., Уразбахтин Р. Р.
ФГБОУ ВО «УУНиТ»

ВЛИЯНИЕ ТИПА ОБМОТКИ СТАТОРА НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ МОЩНОСТЬЮ 40 кВт¹

Аннотация: В данной работе представлены результаты оценки влияния типа обмотки статора (зубцовая, распределенная) на выходные характеристики на примере вентильного электрического двигателя с постоянными магнитами с внешним ротором мощностью 40 кВт. Согласно результатам расчета, при использовании зубцовой обмотки масса активной части электрического двигателя меньше на 0,83%. Также стоит отметить, что выходная мощность для электродвигателя с зубцовой обмоткой на 3,5 кВт выше.

Ключевые слова: электрическая машина, электрический двигатель, распределенная обмотка, зубцовая обмотка, эффективность.

I. ВВЕДЕНИЕ

Развитие концепций электрической авиации – это тренд последних десятилетий, который с каждым годом набирает всю большую популярность как среди авиационных корпораций, так и среди исследовательских сообществ.

¹Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых, тема «АП-ЭМ-02-21-ГБ».

Электромеханические преобразователи энергии привлекают своей эффективностью, надежностью и удобством обслуживания [1-4].

К устройствам, проектируемым для авиационной промышленности, выдвигаются серьезные требования по массогабаритным показателям. Электрические машины не являются исключением: выбор конструктивного исполнения электрической машины напрямую влияет на все выходные параметры, поэтому данный шаг является ответственным этапом в разработке электрических машин [5-7].

В качестве основы для авиации широко используются электрические машины с постоянными магнитами потому, что они обладают наилучшими удельными показателями и повышенной эффективностью по сравнению с другими типами электрических машин [8].

Выбор типа обмоток и ее конфигурации также важен по нескольким факторам. Во-первых, по абсолютным значениям, потери в обмотках значительно выше потерь в других конструктивных элементах электрических машин. Во-вторых, как правило, обмотка имеет высокую температуру использования, которая ограничивается температурным классом изоляционного материала. В-третьих, выбор конфигурации напрямую сказывается на массе обмотки, а также на возможной сложности реализации системы охлаждения.

В данной работе проводится исследование влияния различных типов обмоток на выходные характеристики вентильного электрического двигателя с постоянными магнитами мощностью 40 кВт. В разделе II данной статьи приводятся результаты электромагнитного и теплового расчетов электродвигателя с зубцовой обмоткой. В разделе III приводятся результаты электромагнитного и теплового расчетов электродвигателя с распределенной обмоткой. Далее приводятся результаты сравнения.

II. ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЬ С ЗУБЦОВОЙ ОБМОТКОЙ СТАТОРА

На рисунке 1 представлен эскиз активной части электродвигателя с зубцовой обмоткой статора. Обмотка статора двухслойная.

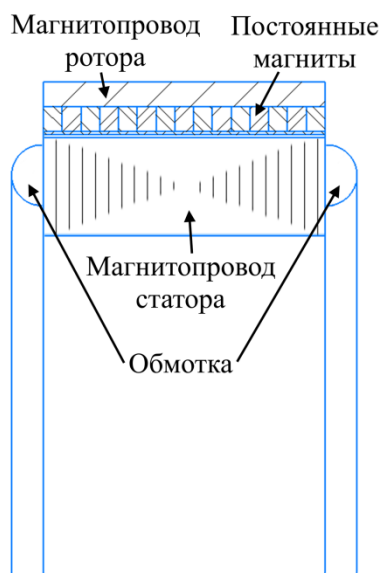


Рис. 1. Эскиз активной части

На рисунках 2-6 представлены характеристики электродвигателя при зубцовой обмотке.

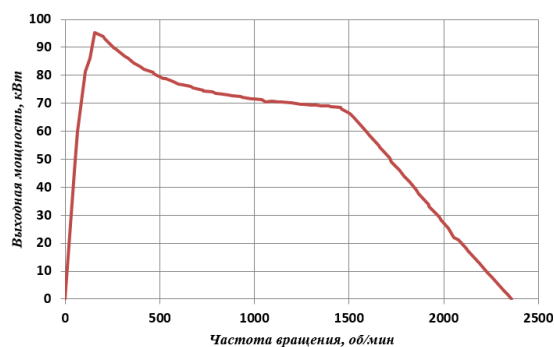


Рис. 2. Функции выходной мощности от частоты вращения

Исходя из рисунка 2 видно, что выходная мощность при частоте вращения 1800 об/мин составила 44,293 кВт.

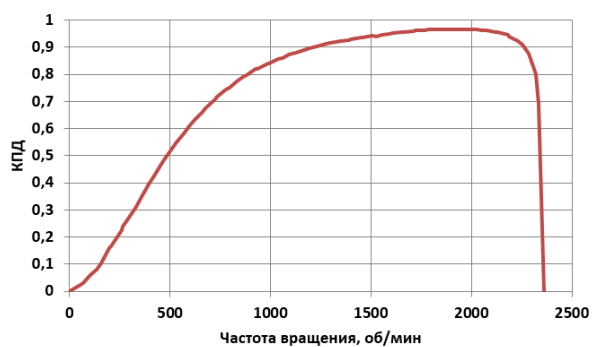


Рис. 3. Функции КПД от частоты вращения

Исходя из рисунка 3 видно, что значение КПД при частоте вращения 1800 об/мин составило 94,4 %.



Рис. 4. Осциллограммы фазных токов

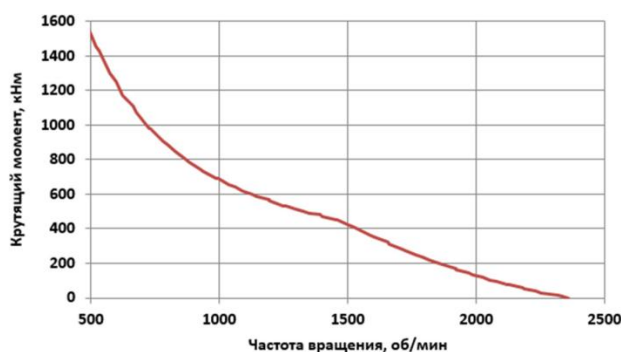


Рис. 5. Функция крутящего момента от частоты вращения

Основные результаты электромагнитного расчета представлены в таблице 1.

Таблица 1

Результаты электромагнитного расчета для зубцовой обмотки

Параметр	Значение
Выходная мощность, Вт	44293
Частота вращения, об/мин	1800
Напряжение питания, В	270
Количество фаз	3
Ток фазы, А	228,7
Количество полюсов/пазов статора	28/30
Частота перемагничивания, Гц	420
Потери в обмотке, Вт	1270,51
Потери в магнитопроводе статора, Вт	664,06
Потери в постоянных магнитах, Вт	200
Общие электромагнитные потери, Вт	2384,57
КПД (электромагнитный), %	94,4
Масса магнитопровода статора, кг	10,5
Масса магнитопровода ротора, кг	4,92
Масса обмотки, кг	3,4
Масса постоянных магнитов, кг	5,1
Масса активной части, кг	23,92
Тип охлаждения	жидкостное

На основе электромагнитного расчета проведен тепловой расчет (рис. 7).
 Результаты теплового расчета представлены в таблице 2.

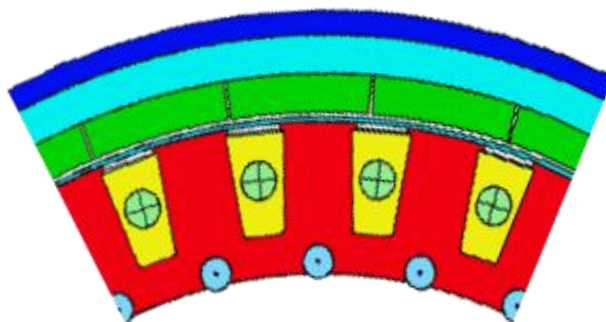


Рис. 6. К теплового расчету электродвигателя

Таблица 2

Результаты теплового расчета
 электродвигателя с зубцовой обмоткой

Элементы конструкции электродвигателя	$T, ^\circ\text{C}$
Лобовые части обмотки	79,8
Активная часть обмотки	90,6
Зубцовая зона статора	69,4
Спинка статора	64,9
Постоянные магниты	53,9

Максимальные рабочие температуры основных активных деталей не превышают максимально допустимых температур для материалов, что свидетельствует об оптимальном установившемся тепловом режиме для продолжительной работы.

III. РАСЧЕТ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С РАСПРЕДЕЛЕННОЙ ОБМОТКОЙ

На рисунке 7 представлен эскиз активной части электродвигателя с распределенной обмоткой статора. Обмотка однослойная.

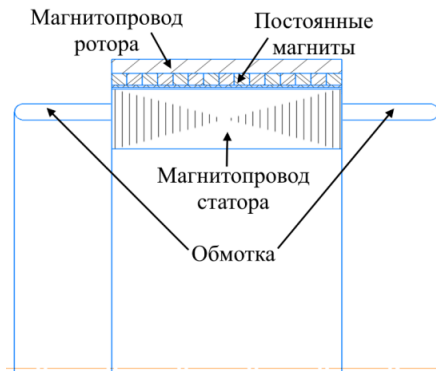


Рис. 7. Эскиз активной части

На рисунках 8-11 представлены характеристики электродвигателя. Основные результаты электромагнитного расчета представлены в таблице 3.

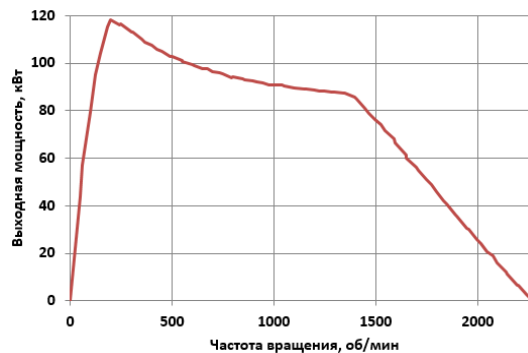


Рис. 8. Функции выходной мощности от частоты вращения

Исходя из рисунка 8 видно, что выходная мощность при частоте вращения 1800 об/мин составила 40,78 кВт.

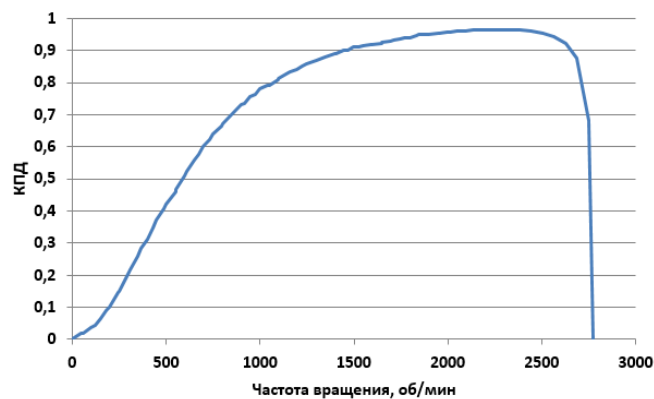


Рис. 9. Функции КПД от частоты вращения

Исходя из рисунка 9 видно, что значение КПД при частоте вращения 1800 об/мин составило 94,87 %.



Рис. 10. Осциллограммы фазных токов

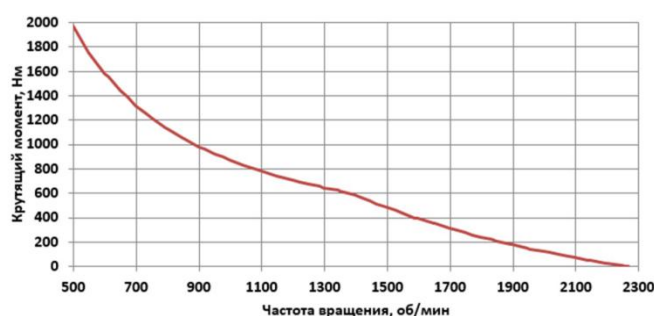


Рис. 11. Функция крутящего момента от частоты вращения

Таблица 3

Результаты электромагнитного расчета для распределенной обмотки

Параметр	Значение
Выходная мощность, Вт	40785,54
Частота вращения, об/мин	1800
Напряжение питания, В	270
Количество фаз	3
Ток фазы, А	194,38
Количество полюсов/пазов статора	28/84
Частота перемагничивания, Гц	420
Потери в обмотке, Вт	951,31
Потери в магнитопроводе статора, Вт	811,09
Потери в постоянных магнитах, Вт	200
Общие электромагнитные потери, Вт	2162,4
КПД (электромагнитный), %	94,87
Масса магнитопровода статора, кг	11,6
Масса магнитопровода ротора, кг	4,72
Масса обмотки, кг	3,7
Масса постоянных магнитов, кг	4,1
Масса активной части, кг	24,12
Тип охлаждения	Масляное

На основе электромагнитного расчета проводится тепловой расчет (рис. 12). Результаты теплового расчета представлены в таблице 4.

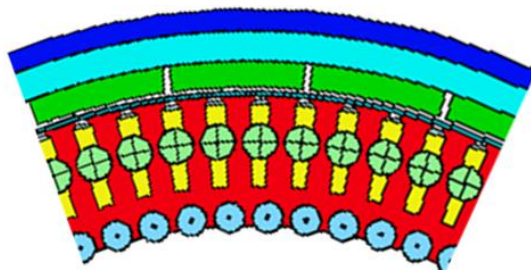


Рис. 12. К теплового расчету электродвигателя

Таблица 4

Результаты теплового расчета для распределенной обмотки

Элементы конструкции электродвигателя	T, °C
Лобовые части обмотки	74,8
Активная часть обмотки	86,7
Зубцовая зона статора	73,1
Спинка статора	69,6
Постоянные магниты	55,3

Максимальные рабочие температуры основных активных деталей не превышают максимально допустимых температур для материалов, что свидетельствует об оптимальном установившемся тепловом режиме для продолжительной работы.

IV. ВЛИЯНИЕ КОНСТРУКЦИИ ОБМОТКИ СТАТОРА НА ВЫХОДНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Сравнение основных показателей представлено в сводной таблице 5.

Таблица 5

Сравнительная таблица

Параметр	Расчет 1 (зубцовая)	Расчет 2 (распределенная)
Выходная мощность, Вт	44293	40785,54
Количество полюсов/пазов статора, шт	28/30	28/84
Масса (активная часть), кг	23,92	24,12

Как видно из представленных результатов, масса активной части электродвигателя с зубцовой обмоткой меньше массы активной части электродвигателя с распределенной обмоткой на 0,83%. Также стоит отметить, что у электродвигателя с зубцовой обмоткой выходная мощность на 3,5 кВт больше по сравнению с электродвигателем с распределенной обмоткой.

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе представлено исследование влияния различных типов обмоток статора на выходные характеристики вентильного электрического двигателя с постоянными магнитами мощностью 40 кВт. При использовании зубцовой обмотки масса активной части электрического двигателя меньше на 0,83% при аналогичных габаритных показателях. Помимо этого, выходная мощность для электродвигателя с зубцовой обмоткой на 3,5 кВт выше.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Gnadt A. R. et al. Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft //Progress in Aerospace Sciences. – 2019. – Т. 105. – С. 1-30.
2. Liu Y. et al. Review of More Electric Engines for Civil Aircraft //International Journal of Aeronautical and Space Sciences. – 2022. – С. 1-10.
3. Agamloh E., Von Jouanne A., Yokochi A. An overview of electric machine trends in modern electric vehicles //Machines. – 2020. – Т. 8. – №. 2. – С. 20.
4. Ramesh P., Lenin N. C. High power density electrical machines for electric vehicles—Comprehensive review based on material technology //IEEE Transactions on Magnetics. – 2019. – Т. 55. – №. 11. – С. 1-21.
5. Sayed E. et al. Review of electric machines in more-/hybrid-/turbo-electric aircraft //IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2021. – Т. 7. – №. 4. – С. 2976-3005.
6. Nøland J. K. et al. Electrical machines and power electronics for starter-generators in more electric aircrafts: A technology review //IECON 2019-45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society. – IEEE, 2019. – Т. 1. – С. 6994-7001.
7. Liu C. Emerging electric machines and drives—An overview //IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2018. – Т. 33. – №. 4. – С. 2270-2280.
8. Ganey E. D., Salam A. Advanced Electric Drives for Aerospace Electric and Hybrid Propulsion //2019 AIAA/IEEE Electric Aircraft Technologies Symposium (EATS). – IEEE, 2019. – С. 1-14.
9. Bauer W., Amrhein W. Electrical design and winding selection for a bearingless Axial-Force/Torque Motor //International Symposium on Power Electronics Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion. – IEEE, 2012. – С. 1224-1229.
10. Yang Y. et al. Thermal management of electric machines //IET Electrical Systems in Transportation. – 2017. – Т. 7. – №. 2. – С. 104-116.
11. Galea M. et al. A thermal improvement technique for the phase windings of electrical machines //IEEE Transactions on Industry Applications. – 2011. – Т. 48. – №. 1. – С. 79-87.

*Жеребцов А. А., Юшкова О. А., Саяхов И. Ф., Зиннатуллина Г. С., Гарипов И. Р.,
Пронин Е. А., Уразбахтин Р. Р.*
ФГБОУ ВО «УУНиТ»

ТЕПЛОВОЙ И ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ ВОЗДУШНОЙ СИСТЕМЫ ОХЛАЖДЕНИЯ ДЛЯ ТЯГОВОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ¹

Аннотация: В данной статье представлены результаты теплового и газодинамического расчета воздушной системы охлаждения для тягового асинхронного двигателя. Проведено исследование оптимального числа лопаток охлаждающего вентилятора с точки зрения потребления и производительности вентилятора, в результате которого выбрана оптимальная конструкция вентилятора, обеспечивающее необходимое охлаждение асинхронного двигателя.

Ключевые слова: асинхронная машина, тепловой расчет, вычислительная гидродинамика, газодинамический расчет, система охлаждения.

I. ВВЕДЕНИЕ

Создание электрических машин (ЭМ) – сложная инженерная задача, для полноценной реализации которой необходимо уделять большое внимание системе охлаждения. Вопросы управления температурным режимом ЭМ являются решающими для повышения выходных характеристик ЭМ и обеспечения надежности конструкции. Исторически при расчетах систем охлаждения ЭМ закладываются большие коэффициенты безопасности для избегания худших сценариев температурных режимов при эксплуатации ЭМ, что приводит к увеличению массогабаритных показателей ЭМ [1, 2].

С увеличением заинтересованности различных областей промышленности в электрификации различных систем растут требования как к выходным, так и к массогабаритным характеристикам. Для удовлетворения данных требований необходимо проводить оптимизацию конструкции ЭМ и проводить глубокий анализ процессов, происходящих в конструкции ЭМ. В частности, особое внимание уделять вопросу управления температурным режимом [2, 3].

¹Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых, тема «АП-ЭМ-02-21-ГБ».

Управление температурным режимом – сложный, но критически необходимый момент создания ЭМ. Высокая рабочая температура приводит к увеличению потерь в обмотках. Превышение максимально допустимых рабочих температур может привести к повреждению изоляции и обмотки, что может стать причиной отказа ЭМ [3, 4].

Несмотря на то, что жидкостное охлаждение по своей эффективности выше, чем воздушное, реализация жидкостного охлаждения приводит к увеличению общей массы системы охлаждения за счет того, что необходимо организовать место хранения охлаждающей жидкости и предусмотреть ее подачу и отвод от ЭМ посредством трубопроводов и насосов. Это вызывает проблемы для использования жидкостного охлаждения в некоторых областях. По этой причине использование воздушного охлаждения в ЭМ не теряет свою актуальность [4, 5].

В данной работе представлено исследование воздушной системы охлаждения тягового асинхронного двигателя (АД) по результату которого подобрана оптимальная конструкция охлаждающего вентилятора, обеспечивающее необходимое охлаждение АД.

II. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Основными потерями в АД являются потери в обмотках, в магнитопроводе и механические потери, включающие в себя потери на трение и аэродинамические потери [6].

Потери в обмотках являются основными по абсолютной величине. При расчете потерь в обмотках необходимо учитывать поверхностный эффект и эффект близости. Поверхностный эффект вызывается вихревыми токами, индуцируемыми собственной потокосцеплением проводника. Эффект близости вызывается потоком от соседних проводников [6].

На практике потери в обмотках рассчитываются по (1) [7]:

$$\Delta P_m = m \cdot I_p^2 \cdot (R + R_{skin}(f) + R_{proximity}(f)) \quad ((1))$$

где ΔP_m – потери в обмотке, m – число фаз, I_p – среднеквадратичное значение фазного тока, f – частота, R – постоянное сопротивление обмотки, $R_{skin}(f)$ – составляющая сопротивления от поверхностного эффект, $R_{proximity}(f)$ – составляющая сопротивления от эффекта близости.

Потери в обмотке напрямую зависят от температуры проводника. С увеличением температуры увеличивается удельное сопротивление обмотки (2), что приводит к росту сопротивления обмотки, так как $R \sim \rho$ [8]:

$$\rho_T = \rho_0 \cdot [1 + \alpha \cdot (T - T_0)] \quad (2)$$

где ρ_T – удельное сопротивление при температуре T , ρ_0 – удельное сопротивление при начальной температуре, α – температурный коэффициент, T – конечная температура, T_0 – начальная температура.

Вторыми по величине потерями являются потери в железе магнитопровода. Потери в железе в основном состоят из потерь на гистерезис и потерь на вихревые токи. Потери на гистерезис вызваны изменяющимся во времени магнитным полем. Потери на вихревые токи вызваны током, наведенным в сердечнике. Для количественной оценки потерь в сердечнике магнитопровода используется уравнение Штейнментца (3) [9]:

$$\Delta P_{cm} = k_s \cdot f^\alpha \cdot B_m^\beta \cdot Vol \quad (3)$$

где ΔP_{cm} – потери в сердечнике магнитопровода, f – частота, B – магнитная индукция, Vol – объем, k_s , α и β – константы, определяемые из экспериментальных данных.

Механические потери состоят из потерь на трение в подшипниках и аэродинамических потерь ротора при вращении. В общем виде выражение для потерь на механические потери можно представить в виде (4) [10]:

$$\Delta P_{.mex} = 2 \cdot D^3 \cdot L \cdot n^3 \cdot 10^{-6} + K_{fb} \cdot G \cdot n \cdot 10^{-3} \quad (4)$$

где $\Delta P_{.mex}$ – механические потери, D , L и G — наружный диаметр, длина и масса ротора соответственно, n – частота вращения, а K_{fb} – коэффициент потерь на трение.

Добавочные потери включают в себя все виды трудноучитываемых потерь, вызванных действием высших гармоник магнитодвижущей силы,

пульсацией магнитной индукции в зубцах и другими причинами. Для учета добавочных потерь используем (5):

$$\Delta P_{доб} = 0,005 \cdot P_1 \quad (5)$$

где P_1 – входная электрическая мощность.

Потери в ЭМ выделяются в виде тепловой энергии, переход потерь в ЭМ в температуру можно представить в виде (6):

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\lambda_{ix} \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\lambda_{iy} \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\lambda_{iz} \frac{\partial T}{\partial z} \right) = -Q_i \quad (6)$$

где λ_{ix} , λ_{iy} , и λ_{iz} – коэффициенты теплопроводности и в x -, y - и z - направлениях для каждой детали соответственно, Q_i – тепловые потери в детали.

Очень часто в численных тепловых расчетах считают, что твердая среда изотропна, вследствие чего (6) принимает вид (7) [11]:

$$\lambda_i \partial T = -Q_i \quad (7)$$

Одной из основных характеристик охлаждающего потока является уравнение неразрывности, отражающее закон сохранения массы (8) [12]:

$$\frac{\partial p}{\partial t} + \nabla \cdot p \vec{V} = 0 \quad (8)$$

где p – давление, t – время, ∇ – дивергенция, V – скорость.

Для стационарного течения потока (8) можно записать в виде (9) [12]:

$$\nabla \cdot p \vec{V} = 0 \quad (9)$$

Общее уравнение сохранения импульса можно записать как (10) [12]:

$$\frac{\partial(p\vec{V})}{dt} = -\nabla p + \nabla \cdot \tau_{ij} + \rho g \quad (10)$$

где τ_{ij} – касательное напряжение, ρ – плотность охлаждающего тела, g – ускорение свободного падения. В (10) ∇p , $\nabla \cdot \tau_{ij}$ и ρg в правой части представляют собой компоненты силы давления, силы вязкости и силы тяжести соответственно.

В случае постоянной вязкости и установившегося течения (10) примет вид (11) [12]:

$$\vec{V} \cdot \nabla \rho \vec{V} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho g \quad (11)$$

где μ – динамическая вязкость.

Если рабочим телом выступает газ, то гравитационной составляющей ρg для случаев вынужденной конвекции можно пренебречь.

В общем виде уравнение конвективного теплообмена между твердой нагретой стенкой и окружающей средой имеет вид (12) [13]:

$$Q = \alpha_{менл} \cdot (T_{ст} - T_{ос}) \cdot F \quad (12)$$

где Q – количество теплоты, $\alpha_{менл}$ – коэффициент теплоотдачи, $T_{ст}$ – температура нагретой стенки твердого тела, $T_{ос}$ – температура охлаждающей среды, F – площадь поверхности теплоотдачи.

На коэффициент теплопередачи влияет множество факторов, вследствие чего она является функцией, зависящей от множества факторов: характера движения охлаждающей среды (свободная, вынужденная, площадь теплоотдачи, скорость охлаждающей жидкости, температурного напора, коэффициента теплопроводности среды, коэффициента теплоотдачи твердого тела и др.

Для принудительной конвекции типичная форма корреляции конвекции имеет вид (13) [14]:

$$Nu = a \cdot (Re)^b \cdot (Pr)^c \quad (13)$$

где Nu , Re и Pr – число Нуссельта, Рейнольдса и Прандля соответственно a , b и c – константы, заданные в соотношении.

Также необходимо учитывать корреляции (14) и (15) [14]:

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot L}{\mu} \quad (14)$$

$$Nu = \frac{\alpha \cdot L}{\chi} \quad (15)$$

где L – гидравлический диаметр, C_p – удельная теплоемкость охлаждающей среды, χ – теплопроводность охлаждающей среды.

Во время работы системы вентиляции охлаждающий воздух сталкивается с гидравлическим сопротивлением трактов охлаждения, что также должно учитываться при расчетах. Потери полного давления в наружной системе

охлаждения обдуваемого ребренного корпуса можно определить как сумму потерь возникающих в отдельных элементах (16):

$$\Delta p = \Delta p_{реш} + \Delta p_{корп} + \Delta p_{орреб} \quad (16)$$

где $\Delta p_{реш}$ – потери во входной решетке кожуха вентилятора, $\Delta p_{корп}$ – потери, связанные с поворотом потока в кожухе, $\Delta p_{орреб}$ – потери, вызванные сопротивлением ребер охлаждения.

Потребный расход охладителя $Q_{охл}$ может быть определен из формулы (17):

$$Q_{охл} = \frac{\Sigma P_{гр}}{c_p \Delta T_{жс}} \quad (17)$$

где $\Sigma P_{гр}$ – греющие потери, c_p – удельная теплоемкость, $\Delta T_{жс}$ – подогрев охладителя.

III. ГАЗОДИНАМИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ

Газодинамический расчет проводится с использованием инструмента для решения задач вычислительной гидрогазодинамики *ANSYS CFX*. В данном пакете решаются стандартные уравнения Навье-Стокса для вязкой сплошной среды, дополненные уравнениями модели турбулентности (в данном случае *k-ε*). Расчет проводится в псевдо-стационарной постановке, на полноразмерной модели вентиляционной системы охлаждения.

Оптимизация конструкции сводится к определению потребной густоты лопаток. Определяется объемный расход воздуха в зависимости от числа лопаток. Для этого проводится исследование для конфигураций с количеством лопаток вентилятора от 9 до 15 с шагом 2. Расчетная модель представлена на рисунке 1, она состоит из двух областей: неподвижной и окружающей лопасти, вращающейся со скоростью 2400 об/мин. Связь между областями течения, осуществлялась интерфейсом с условием *Stage* (осреднение в окружном направлении). Размер пристеночных ячеек выбран так, чтобы значение параметра Y^+ на поверхности лопасти составлял по результатам расчетов не более 30. Внешние границы расчетной модели задавались как непроницаемые

стенки (рис. 1). Сетка конечных объемов состоит из 17278647 элементов и 3483381 ячеек (рис. 2). Минимальный размер элемента – 1 мм, максимальный – 15 мм. Результаты газодинамического расчета системы охлаждения представлены на рис. 3 и 4.

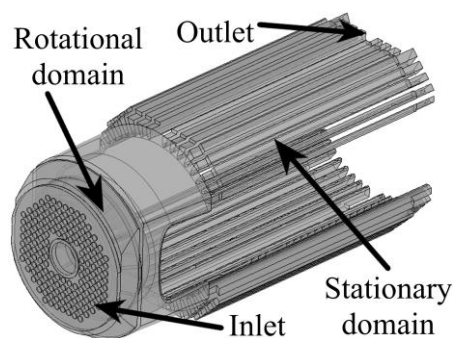
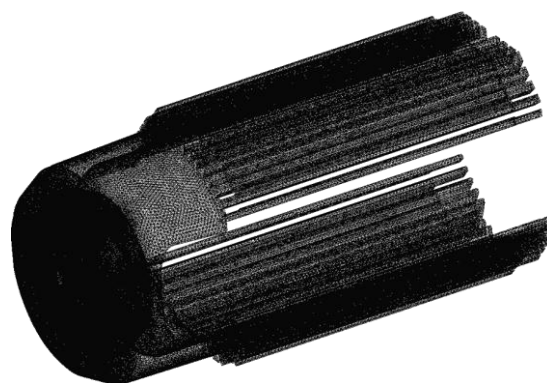
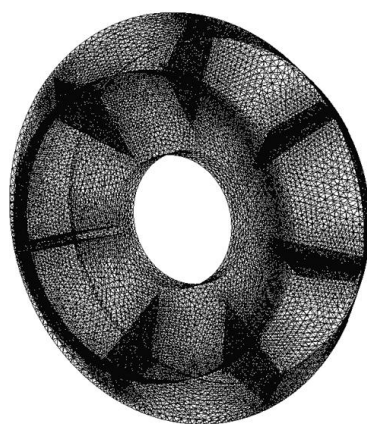


Рис. 1. Граничные условия



a



б

Рис. 2. Расчетная сетка: *a* – корпус, *б* – рабочее колесо

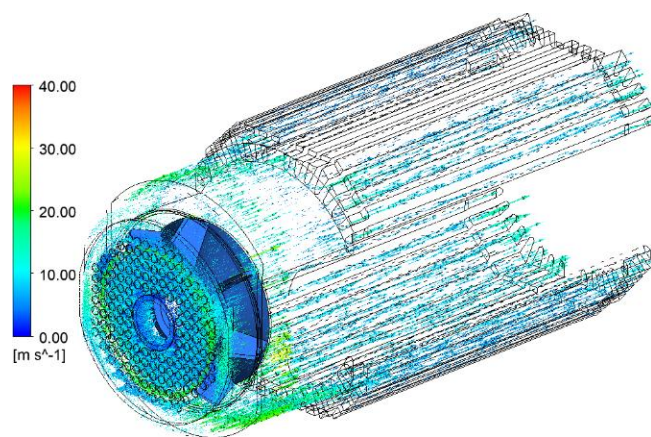


Рис. 3. Векторное поле осевой скорости в системе охлаждения

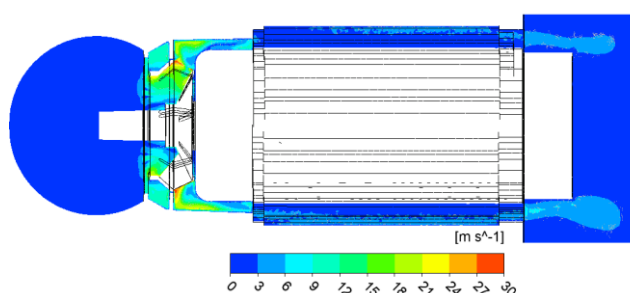


Рис. 4. Поле скоростей в продольном сечении модели

Обтекание профилей вентилятора соответствует теории центробежных турбомашин и не имеет развитых отрывных зон, вызванных срывом с поверхности лопатки. Отсутствуют развитые зоны обратных течений во входном устройстве системы охлаждения. Конструкция вентилятора предусматривает покрывной диск, за счет чего утечки в радиальном зазоре не препятствуют работе системы охлаждения электродвигателя.

В результате моделирования определены параметры, обеспечивающие потребный коэффициент теплоотдачи с поверхности теплообменника. Результаты расчета для различных конфигураций представлены в таблице 1.

Результаты моделирования вентиляторов различных конфигураций

Число лопаток	Скорость на входе, м/с	Скорость на выходе, м/с	Потребляемая мощность, Вт	Объемный расход воздуха, л/мин
7	5,4935	9,9561	24,895	3100
9	5,6574	10,579	28,497	3337
11	5,7791	10,859	28,500	3434
13	5,7965	11,269	29,891	3587
15	5,8262	11,234	29,787	3539

Потребляемая вентилятором мощность для исследованных конфигураций лежит в диапазоне от 24 до 30 Вт. Максимальный расход воздуха наблюдается для случая с 13 лопастями, именно такое конструктивное исполнение выбрано как оптимальное для обеспечения наилучшего охлаждения. Объемный расход воздуха через радиатор в таком случае составляет – 3587 л/мин, при этом скорость потока на выходе из вентилятора – 30,85 м/с, скорость потока на выходе из каналов охлаждения – 11,269 м/с, расчетное значение степени повышения давления в рабочем колесе вентилятора – 1,01, расчетное значение полного давления за рабочим колесом вентилятора 103352 Па.

IV. ТЕПЛОВОЙ РАСЧЕТ

Тепловой расчет проводится на длительность работы АД в 10 минут, при максимально возможной температуре окружающей среды 45°C. Результаты расчета приведены на рис. 5-7.

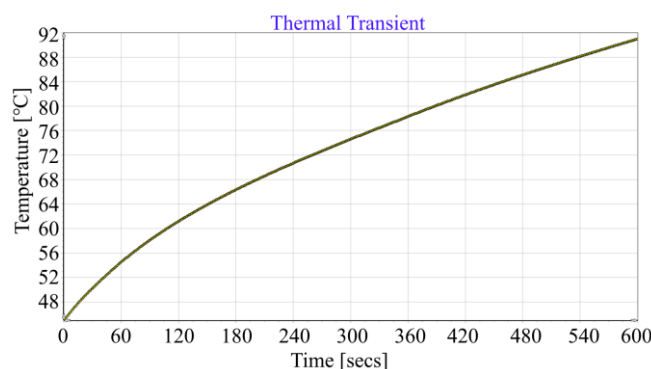


Рис. 5. График изменения температуры обмотки статора за 600 сек. работы

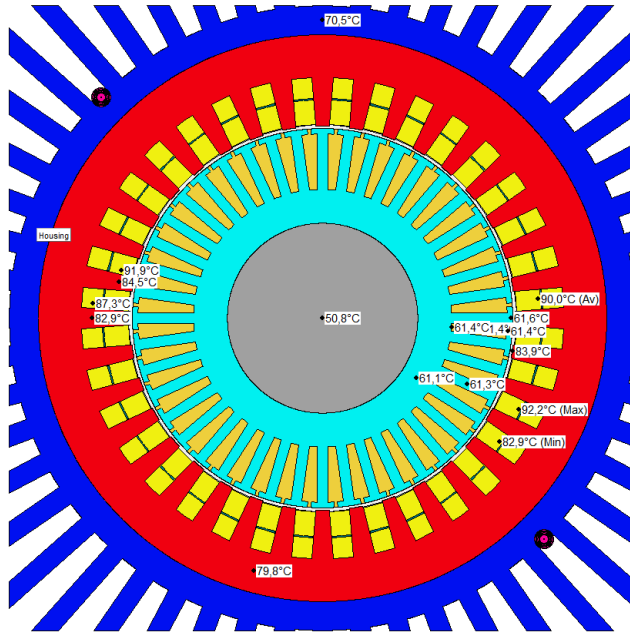


Рис. 6. Температура элементов двигателя спустя 600 сек. работы

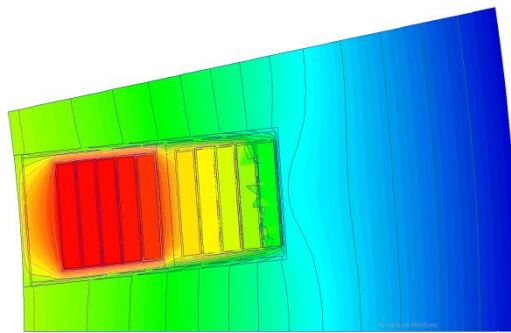


Рис. 7. Температура обмотки статора спустя 600 сек. работы

Также был произведен расчет температуры в лобовой части обмотки статора АД в продолжительном и повторно-кратковременном режимах работы.

Длительность продолжительного режима ($S1$) составляет 5 часов. Температура окружающей среды 25°C . Результаты расчета приведены на рис. 8.

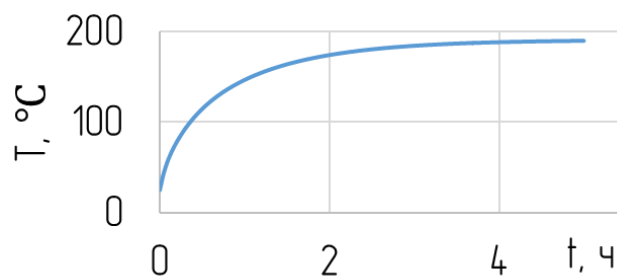


Рис. 8. График изменения температуры лобовой части обмотки в продолжительном режиме работы

Длительность повторно-кратковременного режима работы ($S3$) составляет 5 часов, при этом продолжительность включения составляет 50%, продолжительность одного цикла – 10 мин. Результаты расчета приведены на рис. 9.

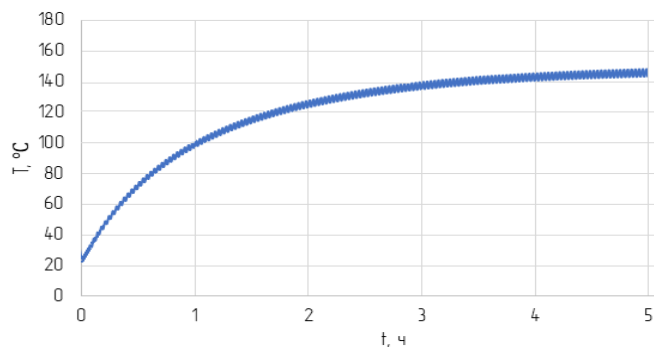


Рис. 9. График изменения температуры лобовой части обмотки в повторно-кратковременном режиме работы

Из полученных результатов видно, что максимальный нагрев ЭМ при работе в течение 10 минут при окружающей температуре не превышает 100°C . Для продолжительного 5-часового режима работы максимальная температура в лобовых частях обмотки статора составляет $190,48^{\circ}\text{C}$, при повторно-кратковременном режиме (10 мин) – $151,2^{\circ}\text{C}$. Таким образом, температурный режим работы не превышает предельных значений 220°C .

V. ВЫВОД

В данной статье проведено исследование воздушной системы охлаждения тягового АД. В результате работы определена оптимальная конструкция охлаждающего вентилятора с точки зрения потребления мощности и производительности, который обеспечивает необходимое охлаждение ЭМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Carriero A. et al. A review of the state of the art of electric traction motors cooling techniques. – 2018.
2. Gai Y. et al. Cooling of automotive traction motors: schemes, examples, and computation methods //IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2018. – Т. 66. – №. 3. – С. 1681-1692.
3. Gundabattini E. et al. A review on methods of finding losses and cooling methods to increase efficiency of electric machines //Ain Shams Engineering Journal. – 2021. – Т. 12. – №. 1. – С. 497-505.

4. Deisenroth D. C., Ohadi M. Thermal management of high-power density electric motors for electrification of aviation and beyond //Energies. – 2019. – T. 12. – №. 19. – C. 3594.
5. Tikadar A. et al. Comparison of electro-thermal performance of advanced cooling techniques for electric vehicle motors //Applied Thermal Engineering. – 2021. – T. 183. – C. 116182.
6. de Almeida A. T. et al. Electric motor standards, ecodesign and global market transformation //2008 IEEE/IAS Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference. – IEEE, 2008. – C. 1-9.
7. Sudhoff S. D. AC conductor losses. – 2014.
8. Demetriades G. D. et al. A real-time thermal model of a permanent-magnet synchronous motor //IEEE Transactions on Power Electronics. – 2009. – T. 25. – №. 2. – C. 463-474.
9. Tacca H. E., Sullivan C. R. Extended steinmetz equation. – 2002.
10. Wang R. J., Heyns G. C. Thermal analysis of a water-cooled interior permanent magnet traction machine //2013 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT). – IEEE, 2013. – C. 416-421.
11. Semyonov D. et al. Computational studies for the design of process equipment with complex geometries. – 2014.
12. Chong Y. C. Thermal analysis and air flow modelling of electrical machines. – 2015.
13. Kang M. et al. An Improved Rotor Cooling Structure of IPMSM //2019 22nd International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS). – IEEE, 2019. – C. 1-6.
14. Staton D. A., Cavagnino A. Convection heat transfer and flow calculations suitable for electric machines thermal models //IEEE transactions on industrial electronics. – 2008. – T. 55. – №. 10. – C. 3509-3516.
15. Staton D. Thermal analysis of traction motors //2014 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC). – IEEE, 2014. – C. 1-139.

НОВЫЙ ПОДХОД К РАЗРАБОТКЕ БЕСШУМНОЙ СВЯЗИ ПО ЛИНИЯМ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧ ПОСТОЯННОГО ТОКА В ЭЛЕКТРОМОБИЛЯХ¹

Аннотация: Связь по автомобильным линиям электропередач (VPLC) использует существующие автомобильные линии электропередач в качестве канала связи, устраняя необходимость в отдельной линии связи для транспортных средств и максимально увеличивая внутреннее пространство. С увеличением количества электронных устройств, устанавливаемых в автомобили, особенно для подключаемых электрических транспортных средств, VPLC оценивается как более конкурентоспособная альтернатива, позволяющая минимизировать сложность конструкции, вес и стоимость. Однако шина постоянного тока в автомобиле создает случайные шумы. Битовая ошибка и задержка VPLC могут быть вызваны шумом. Кроме того, этот шум вызывает неэффективность связи транспортное средство к сети (V2G). следовательно, важно оценить шум канала VPLC. Таким образом, необходимо проанализировать характеристики шумового сигнала в технология связи по линии электросети (PLC). Статья включает обобщенный процесс фильтрации шумовых сигналов для обоснования предлагаемой модели системы с модуляцией и демодуляцией с помощью двоичной частотной манипуляции (BFSK) в среде SIMULINK.

Ключевые слова: бинарная частотная модуляция, технология связи по линии электросети, транспортное средство к сети.

I. ВВЕДЕНИЕ

Кабели, соединяющие электронные компоненты, приводят к тяжелым, дорогим и сложным жгутам проводов по мере увеличения размера и сложности компонентов и датчиков автомобиля [1]. Автомобильный PLC изучается как возможное средство снижения сложности и стоимости автомобильных жгутов проводов в результате увеличения количества развернутых электронных устройств и датчиков в транспортных средствах.

Линия связи может быть интегрирована в зарядную линию питания обычным способом, однако это затратно и требует не менее 4-6 контактов в зарядной линии. На рынке доступно несколько зарядных портов, однако они не могут соединяться друг с другом из-за отсутствия стандартного дизайна существующего зарядного порта. Производитель создает каждую конструкцию и зарядную станцию и обязан производить ряд портов и опор для различных электрических автомобилей [5]-[18].

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0838-2020-0006.

Адаптивная система согласования импеданса, улучшающая передачу сигнала связи от передатчика к приемнику. Эта система решает проблему зависимости импеданса доступа от времени, частоты и местоположения, что может привести к серьезному рассогласованию импеданса сигнала связи и повысить надежность PLC транспортного средства [2].

Протокол управления доступом к среде (MAC) был предложен для автомобильных систем PLC, в которых несколько узлов конкурируют за передачу по линии электропередачи постоянного тока (DC). Предлагаемый протокол использует комбинацию временного и частотного мультиплексирования, что позволяет разработать надежный протокол MAC на основе конкуренции для систем VPLC. Этот протокол также может повысить надежность VPLC [3].

Структура модели передачи для системы VPLC построена с использованием Simulink. Исходный сигнал был модифицирован модулятором BFSK, который соответствует фактической системе VPLC, прежде чем доставляться в канал VPLC. Цифровые данные, поступающие от центрального электронного блока управления (CECU)/терминальных устройств, модулируются блоком связи по линии электропередач (PLCU) перед подключением к каналу линии питания постоянного тока для транспортных средств [4].

На следующем рисунке 1 показаны соединения PLC в инфраструктуре зарядки электромобилей:

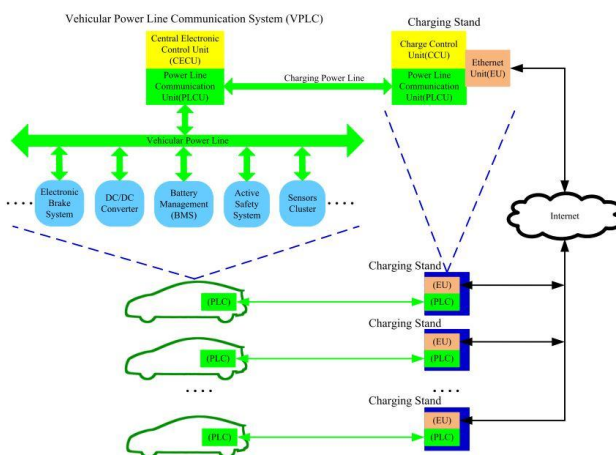


Рис. 1. Инфраструктура VPLC в деталях

Однако PLC по шине постоянного тока создает множество типов шумов. На рисунке 2 показаны типы шумового сигнала, который теперь обобщается как шумовой сигнал при моделировании:

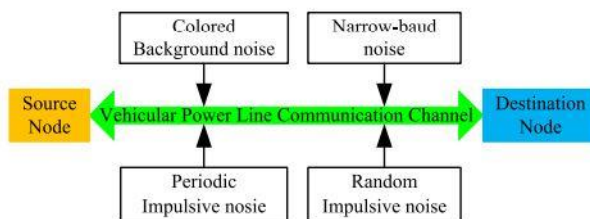


Рис. 2. Типы помех по шине постоянного тока PLC

На рис. 3 показана топология модели передачи на основе Simulink системы VPLC. Исходный сигнал должен быть промодулирован модулятором BFSK, который соответствует фактической системе VPLC, прежде чем он будет доставлен в канал VPLC. PLCU модулирует цифровые данные, поступающие от СЕСУ/терминальных устройств, прежде чем подавать их в канал линии питания постоянного тока для транспортных средств.

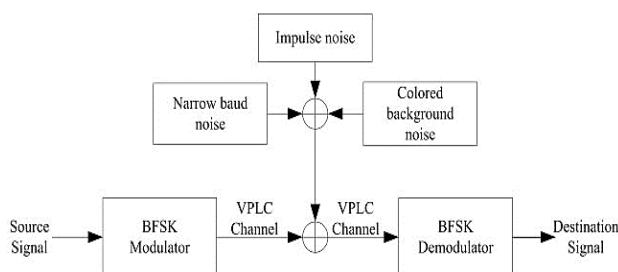


Рис. 3. Модель передачи VPLC

Анализируется производительность системы связи V2G. Подключаемый электромобиль (PEV) имеют блоки нагрузки/накопления, которые могут заряжаться или разряжаться от сети, что влияет на сеть, особенно на микросети [19]–[25]. PEV с батареей на 20 кВтч может иметь доступ к микросети постоянного тока мощностью 200 кВт, как показано на рисунке 1. При зарядке батареи напряжение колеблется, что, вероятно, вызвано шиной постоянного тока в микросети постоянного тока. Мерцание напряжения — не единственный

негативный эффект крупномасштабного доступа PEV к сети или микросети. Чтобы обеспечить стабильное функционирование сети и микросети, эффективная система информационного взаимодействия V2G может помочь сети реагировать на доступ PEV, прогнозируя поведение зарядки и разрядки PEV. Мерцание напряжения в микросети постоянного тока показано на рисунке 4.

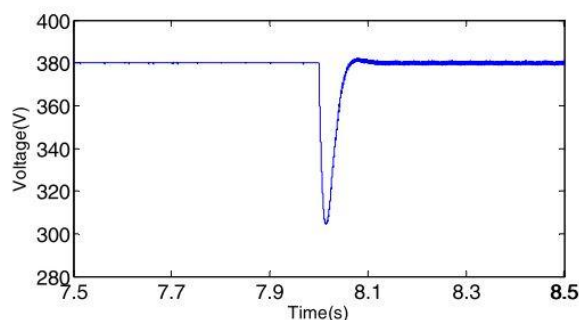


Рис. 4. Мерцание напряжения в микросети постоянного тока

Основные участки сети связи по линиям электропередач показаны на рисунке 5.

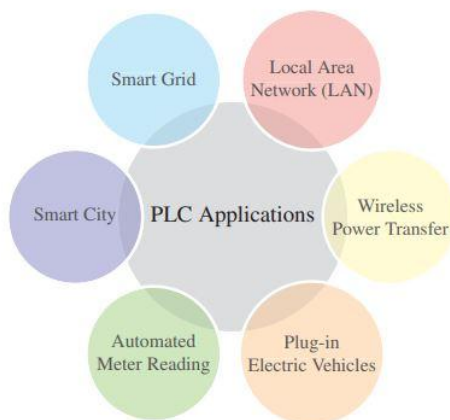


Рис. 5. Основные применения PLC

На рисунке 6 показано качественное сравнение различных схем подавления импульсного шума для PLC.

	<i>Error handling mechanisms</i>	<i>Modulations schemes</i>	<i>Time-domain techniques</i>	<i>CS-based approaches</i>
Features	ARQ, FEC interleavers	SC, MC, FFT-OFDM, DWT-OFDM, MIMO	Clipping Blanking, iterative techniques	CS SBL frameworks
Modelling principle and basics	Retransmission Redundancy Interleaving Multiplexing	SC & MC transmission Orthogonality Cyclic prefix Equalisers Time-frequency diversity	Impulse detection Distribution of impulse noise Threshold-based Iterative Null and pilot tones	Sparsity prior (distribution) of signal information Convex relaxation methods Null and pilot tones MAP and EM Low-medium
BER performance (high SNR)	Low	Low-medium	Low-medium	Low-medium
BER performance (low SNR)	Low-medium	Medium	Medium-high	Low-medium
Transmitter complexity	Medium	Low	Low	very low
Receiver complexity	Medium-high	Medium	Medium-high	Low-medium
Impulsive noise mitigation	Medium-high	Low-medium	Medium	Medium-high

Рис. 6. Качественное сравнение различных схем подавления импульсных шумов для PLC

II. МОДЕЛИРОВАНИЕ

Предлагаемый подход к моделированию показан на рисунке 7, а на рисунке 8 вид исследуемой модели в SIMULINK. Метод модулирует двоичные данные по несущему сигналу, а также добавляет шум через линию питания постоянного тока. Сигнал несущей частоты и нежелательный шум отфильтровывались с помощью контура фазовой автоподстройки частоты. Таким образом, демодуляция позволила восстановить исходный поток данных. Здесь отображается базовый сетевой алгоритм PLC между передающим узлом и принимающим узлом. Состав блока Power line communication network изображен на рисунке 9.

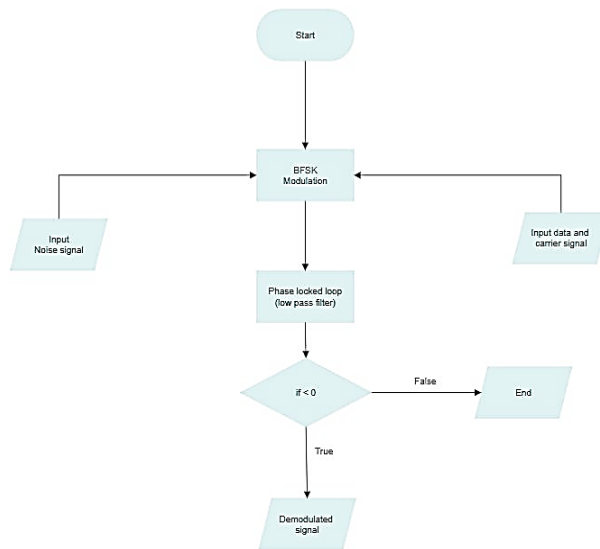


Рис. 7. Метод моделирования сети PLC

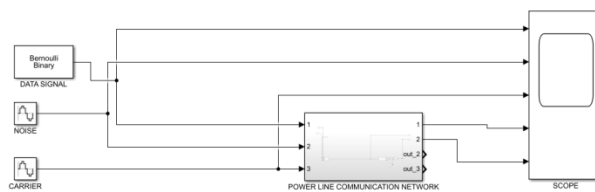


Рис. 8. Метод моделирования сети PLC в среде SIMULINK

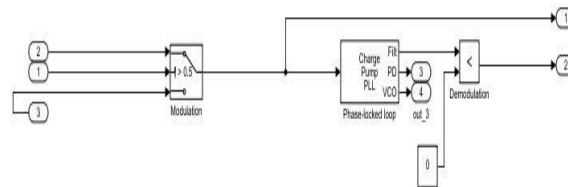


Рис. 9. Блок сети связи по ЛЭП

III. РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты показывают, что точность предложенной модели для метода демодуляции от модулированного шумового сигнала по линии электропередачи постоянного тока была вполне удовлетворительной. На рисунке 10 показаны модулирующие сигналы сети связи по линиям электропередач постоянного тока. На рисунке 11 показан исходный демодулированный сигнал в качестве выходного сигнала.

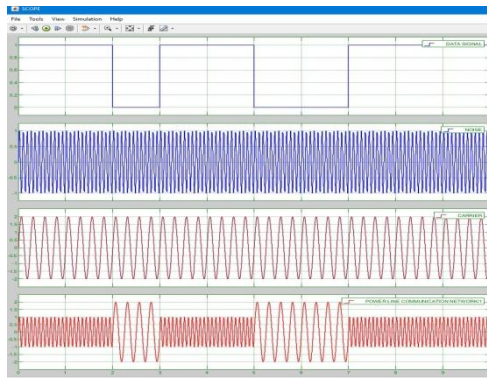


Рис. 10. Модулирующий сигнал с передаваемыми данными в сети PLC

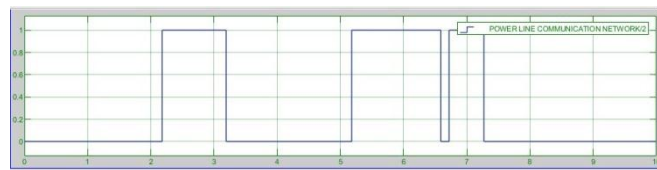


Рис. 11. Демодулированный сигнал от BFSK PLC

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В отличие от OFDM (мультиплексирование с ортогональным частотным разделением каналов), архитектура двоичной манипуляции со сдвигом (BFSK), как правило, проще в построении и имеет полосу пропускания, достаточную для автомобильных систем связи. В этом исследовании модель BFSK установлена и выбрана для системы связи автомобильной линии электропередач. Дальнейшее исследование требует детальной классификации шумовых сигналов на основе шума, генерируемого окружающими силовыми компонентами в электромобиле, разработки математической модели для всех типов шумов/помех, определения коэффициента битовых ошибок из-за различных шумов и, наконец, разработать модифицированную сетевую модель ПЛК.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. S. Chakraborty and S. Nandi, "IEEE 802.11s mesh backbone for vehicular communication: Fairness and throughput," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 62, no. 5, pp. 2193–2203, Jun. 2013.
2. Y. Huo, W. Tu, Z. Sheng, and V. C. M. Leung, "A survey of in-vehicle communications: Requirements, solutions and opportunities in IoT," in *Proc. IEEE 2nd World Forum Internet Things (WF-IoT)*, Dec. 2015, pp. 132–137.

3. N. Taherinejad, L. Lampe, and S. Mirabbasi, "An adaptive impedancematching system for vehicular power line communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 2, pp. 927–940, Feb. 2016.
4. L. Zhang, H. Ma, D. Shi, P. Wang, G. Cai and X. Liu, "Reliability Oriented Modeling and Analysis of Vehicular Power Line Communication for Vehicle to Grid (V2G) Information Exchange System," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 12449-12457, 2017, doi: 10.1109/ACCESS.2017.2717452.
5. T. S. Ustun, C. R. Ozansoy, and A. Zayegh, "Implementing vehicle-to-grid (V2G) technology with IEC 61850-7-420," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 2, pp. 1180–1187, Jun. 2013.
6. X. Ge, H. Cheng, G. Mao, Y. Yang, and S. Tu, "Vehicular communications for 5G cooperative small-cell networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 10, pp. 7882–7894, Oct. 2016.
7. D. T. Hoang, P. Wang, D. Niyato, and E. Hossain, "Charging and discharging of plug-in electric vehicles (PEVs) in vehicle-to-grid (V2G) systems: A cyber insurance-based model," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 732–754, 2017.
8. J. Choi, V. Va, N. Gonzalez-Prelcic, R. Daniels, C. R. Bhat, and R. W. Heath, Jr., "Millimeter-wave vehicular communication to support massive automotive sensing," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 54, no. 12, pp. 160–167, Dec. 2016.
9. J. J. Escudero-Garz as, A. García-Armada, and G. Seco-Granados, "Fair design of plug-in electric vehicles aggregator for V2G regulation," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 61, no. 8, pp. 3406–3419, Oct. 2012.
10. D. Q. Xu, G. Joos, M. Levesque, and M. Maier, "Integrated V2G, G2V, and renewable energy sources coordination over a converged fiber-wireless broadband access network," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 4, no. 3, pp. 1381–1390, Sep. 2013.
11. Z. Yang, S. Yu, W. Lou, and C. Liu, "P2: Privacy-preserving communication and precise reward architecture for V2G networks in smart grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 697–706, Dec. 2011.
12. H. Wang, B. Qin, Q. Wu, L. Xu, and J. Domingo-Ferrer, "TPP: Traceable privacy-preserving communication and precise reward for vehicle-to-grid networks in smart grids," *IEEE Trans. Inf. Forens. Security*, vol. 10, no. 11, pp. 2340–2351, Nov. 2015.
13. H. Guo, Y. Wu, F. Bao, H. Chen, and M. Ma, "UBAPV2G: A unique batch authentication protocol for vehicle-to-grid communications," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 4, pp. 707–714, Dec. 2011.
14. W. Viriyasitavat, M. Boban, H.-M. Tsai, and A. Vasilakos, "Vehicular communications: Survey and challenges of channel and propagation models," *IEEE Veh. Technol. Mag.*, vol. 10, no. 2, pp. 55–66, Jun. 2015.
15. W. Kumar, S. Bhattacharya, B. R. Qazi, and J. M. H. Elmirghani,
16. M. Boban and P. M. d'Orey, "Exploring the practical limits of cooperative awareness in vehicular communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 6, pp. 3904–3916, Jun. 2016.
17. M. J. Farooq, H. ElSawy, and M.-S. Alouini, "A stochastic geometry model for multi-hop highway vehicular communication," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 3, pp. 2276–2291, Mar. 2016.
18. Z. Sheng, A. Kenarsari-Anhari, N. Taherinejad, and V. C. M. Leung, "A multichannel medium access control protocol for vehicular power line communication systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 65, no. 2, pp. 542–554, Feb. 2016
19. R. Faria, P. Moura, J. Delgado, and A. T. de Almeida, "Managing the charging of electrical vehicles: Impacts on the electrical grid and on the environment," *IEEE Intell. Transp. Syst. Mag.*, vol. 6, no. 3, pp. 54–65, Jul. 2014.
20. E. Sortomme and M. A. El-Sharkawi, "Optimal charging strategies for unidirectional vehicle-to-grid," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 2, no. 1, pp. 131–138, Mar. 2011.
21. M. Yilmaz and P. T. Krein, "Review of the impact of vehicle-to-grid technologies on distribution systems and utility interfaces," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 28, no. 12, pp. 5673–5689, Dec. 2013.

22. X. Hu, Y. Zou, and Y. Yang, “Greener plug-in hybrid electric vehicles incorporating renewable energy and rapid system optimization,” *Energy*, vol. 111, pp. 971–980, Sep. 2016.
23. C. Zou, C. Manzie, and D. Nešić, “A framework for simplification of PDEbased lithium-ion battery models,” *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 24, no. 5, pp. 1594–1609, Sep. 2016.
24. X. Hu, C. M. Martinez, and Y. Yang, “Charging, power management, and battery degradation mitigation in plug-in hybrid electric vehicles: A unified cost-optimal approach,” *Mech. Syst. Signal Process.*, vol. 87, pp. 4–16, Mar. 2017.
25. J.-H. Li, Z. Zhang, D. Fang, X.-Y. Zhang, and M.-X. Ju, “Optimal planning of charging station for electric vehicle based on hybrid differential evolution and bee colony algorithm,” *J. Northeast Dianli Univ.*, vol. 36, no. 4, pp. 84–90, 2016.

Русаков А. М., Соломин А. Н.
ФГБОУ ВО «НИУ «МЭИ»

ОПЫТ РАЗРАБОТОК ИНДУКТОРНЫХ МАШИН С ОБМОТКОЙ ВОЗБУЖДЕНИЯ ДЛЯ ПРИМЕНЕНИЯ В СОСТАВЕ СТАЦИОНАРНЫХ И ПОДВИЖНЫХ ОБЪЕКТОВ

Аннотация. Индукторные машины с обмоткой возбуждения в силу таких достоинств как бесконтактность и наличие обмотки возбуждения являются перспективными для использования их в составе электрооборудования стационарных и подвижных объектов.

В статье приведены результаты уникальных разработок как генераторов, так и двигателей, выполненных на базе этих машин, достигнутые с участием авторов, и на основании этого делается вывод о их конкурентоспособности с более распространенными асинхронными, синхронными машинами и машинами постоянного тока.

Ключевые слова: Индукторные машины, генераторы, вентильные двигатели, тяговые электромеханические системы стационарных и подвижных объектов.

В большом многообразии типов электрических машин и их конструктивных модификаций существует группа машин, которым в литературе уделяется незначительное внимание. Между тем некоторые из них представляют несомненный интерес не только в научном, но в практическом отношении. К ним можно отнести и индукторные машины, определятельным признаком которых является изменение в режиме холостого хода магнитной индукции в воздушном зазоре только по величине, но не по знаку. Переменный магнитный поток, необходимый для индуцирования в обмотках ЭДС и создания электромагнитного момента, обеспечивается за счет изменения сопротивления контура замыкания магнитного потока возбуждения, которое происходит за счет вращения зубчатого ротора.

Индукторные машины известны с середины XIX века [1]. Свой вклад в их развития на разных этапах внесли такие ученые как П.Н.Яблочков (1877), Н.Тесла (1889), М.О. Доливо-Добровольский (конец 1890-х) и др.

В советское время развитие теории индукторных машин было связано с Р.П.Жижериным, М.М.Алексеевой, Б.С.Зечихиным, В.В.Апситом, Л.Э. Домбуром, Н.Я. Альпером, А. А. Терзяном [2]-[5].

Поначалу индукторные машины применялись только в качестве генераторов. Начиная с 1980-х годов, индукторные машины начали использоваться в составе вентильных двигателей.

С начала 1960-х годов немалое внимание индукторным машинам уделяется на кафедре электротехнических комплексов автономных объектов и электрического транспорта (ЭКАО и ЭТ) НИУ "МЭИ". Среди ученых кафедры, внесших наибольший вклад в исследование и их применение, можно назвать В.А.Балагурова, А.М.Сугрובה, П.А.Тыричева, А.Н.Ледовского, А.М.Русакова [6]-[8].

Из класса индукторных машин выделим индукторные машины с явновыраженной кольцевой обмоткой возбуждения (рис.1), называемые также одноименнополюсными или аксиальными индукторными машинами [5].

Основными достоинствами этого типа электрических машин, привлекающими внимание разработчиков, являются простота и надежность конструкции, бесконтактность и возможность регулирования магнитного потока за счет изменения тока в обмотке возбуждения.

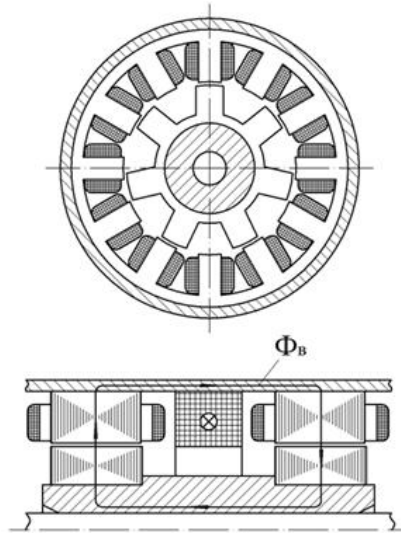


Рис. 1. Конструктивная схема двухполюсной индукторной машины с обмоткой возбуждения

Разнообразные модификации одноименнополюсных индукторных машин (ОИМ) позволяют обеспечивать выполнение основных требований, предъявляемых в большинстве областей их применения.

В частности, наряду с двухполюсным исполнением, приведенным на рис.1, распространение получили многополюсные ОИМ, позволяющие при ограниченном внешнем диаметре, свойственном таким применениям как высокоскоростные стартер-генераторы и турбогенераторы, малоинерционные электродвигатели, достигать значительных мощностей, используя фиксированные по размерам пластины статора и ротора.

Возможность использования опущенной катушки возбуждения, располагающейся между пакетами ротора, при некотором усложнении конструкции позволяет получить существенный выигрыш в массогабаритных показателях электрической машины – важный практически для всех областей применения.

Определительная особенность ОИМ, связанная с тем, что в пределах одного пакета зубцы ротора представляют собой полюсы одной полярности (число пар полюсов в ОИМ равно числу зубцов ротора), позволяет расположить большое число полюсов в ограниченном диаметре, не увеличивая число

катушек возбуждения, и обеспечить требуемую частоту выходного напряжения при низкой частоте вращения свойственной ветроэнергетическим, гидрогенераторным и другим установкам,

Использование в ряде применений сосредоточенных зубцовых катушек позволяет достичь минимального вылета лобовых частей, что также обеспечивает выигрыш в массе и осевых размерах машины.

Все перечисленное способствовало успешному применению ОИМ в различных разработках кафедры во многих областях техники.

Генераторные установки на мобильных объектах специального назначения

В конце 1980-х годов сотрудниками кафедры ЭКАО и ЭТ были разработаны и доведены до серийного выпуска бесконтактные индукторные генераторы мощностью 3 и 6,5 кВт для систем электроснабжения мобильного объекта специального назначения, заменившие применяемые ранее коллекторные генераторы постоянного тока, став почти на 25% легче и меньше своего контактного аналога, обеспечив при этом выигрыш по КПД и пульсации выходного напряжения.

Гидрогенераторы для малых ГЭС

Качества индукторных машин в большей степени проявляются при больших мощностях. С участием авторского коллектива для малых ГЭС были разработаны гидрогенераторы, работающие как непосредственно на сеть при постоянной частоте вращения приводного вала, так и питающие потребителей через преобразователь частоты при переменной частоте вращения. Гидрогенераторы имели как капсульное исполнение (рис.2) с комбинированным воздушно-водяным охлаждением, так и бескапсульное с воздушным охлаждением.

По выполненному проекту на малых гидроэлектростанциях в Белоруссии были установлены индукторные гидрогенераторы мощностью 150 кВт с частотой вращения 428 об/мин и мощностью 100 кВт с частотой вращения 273 об/мин (рис.2). Выполнение требования по ограниченным радиальным

размеров стало возможным при использовании шестипакетной конструкции машины. В условиях малого напора и безредукторного исполнения несмотря на ограничения по размерам получение выходной частоты 50 Гц было достигнуто за счет размещения большого числа пар полюсов (зубцов ротора).



Рис. 2. Капсульный индукторный гидрогенератор

На статоре генераторов были размещены зубцовые катушки, что способствовало снижению габаритных размеров и облегчало технологию их установки, а также способствовало получению высокого КПД (более 93%). За счет выбора схемы обмотки и геометрии зубцовой зоны удалось обеспечить коэффициент высших гармоник – не более 3%, что тоже можно отнести к достоинствам индукторных машин. В первых образцах, где применен был скос, показатель синусоидальности был достигнут еще более высокий - 1 %.

В качестве примера разработки индукторных гидрогенераторов с переменной частотой вращения, выполненных с участием авторского коллектива и коллектива ООО "ЭКБ", г.Москва, можно назвать генераторы для малых ГЭС Колумбии (мощностью 600 кВт) и Армении (мощностью 1400 кВт).

Генераторы устанавливались на реках с большим напором, кроме того, в системе были использованы мультипликаторы и преобразователи частоты. Работа генераторов при существенно более высоких частотах вращения позволила спроектировать их с хорошими массогабаритными показателями. Кроме всего прочего, это облегчило транспортировку генераторов от места изготовления до места установки.

Использование девятифазной рабочей обмотки позволило получить приемлемое качество напряжения в звене постоянного тока без использования громоздких фильтров.

Для генераторов был достигнут высокий КПД = 0,96-0,97.

Летом 2022 года прошел стендовые испытания гидрогенератор мощностью 3 МВт с напряжением в звене постоянного тока $U_d=1100$ В, поддерживаемым регулированием тока возбуждения I_v , работающий в диапазоне частот вращения 350-1150 об/мин, выполненный в четырехпакетном исполнении с опущенной обмоткой возбуждения (рис.3), предназначенный для установки в России.

Обеспечение требуемых характеристик генератора при различных частотах вращения достигается путем переключения схемы рабочей обмотки генератора: на малых частотах вращения используется последовательно-параллельное соединение, а на высоких частотах вращение – параллельное соединение (Рис.4-5).



Рис. 3. Ротор индукторного гидрогенератора мощностью 3 МВт

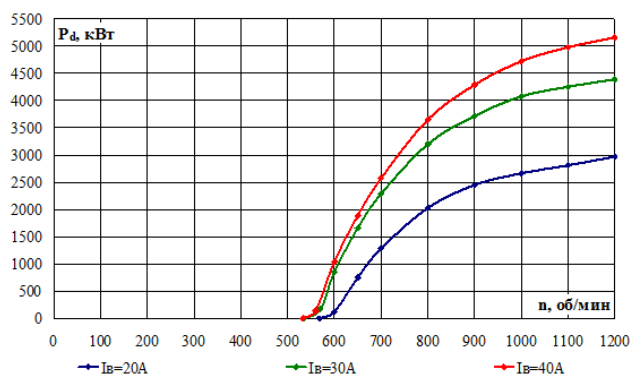


Рис. 4. Зависимость мощности от частоты вращения при $U_d=1100\text{В}$.
при параллельном включении обмоток

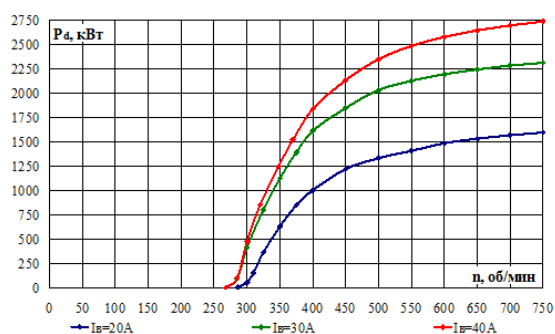


Рис. 5. Зависимость мощности от частоты вращения при $U_d=1100\text{В}$.
при последовательно-параллельном включении обмоток

На стадии эскизного проектирования находится в настоящее время разработка гидрогенератора с максимальной мощностью 150 МВт, переменной частотой вращения, зависящей от расхода воды, с напряжением в звене постоянного тока 20 кВ, также предназначенная для установки на модернизируемой ГЭС в РФ.

Ветрогенераторные установки (ВЭУ)

Из разработок индукторных генераторов, предназначенных для ВЭУ, выделим совместные проекты, выполненные с белорусскими и приднестровскими партнерами. Были доведены до внедрения ветрогенераторы мощностью 20 кВт с диапазоном частот вращения от 40 до 120 об/мин и ветрогенераторы мощностью 250 кВт с постоянной частотой вращения, установленные в итоге на трех лопастях ВЭУ общей мощностью 750 кВт, работающей непосредственно на сеть без преобразователей частоты.

Эксплуатация индукторного генератора в таких условиях показала надежность этой машины в условиях повышенных механических нагрузок.

Тяговые электромеханические системы (ЭМС)

Хорошие регулировочные свойства ОИМ в совокупности с другими их качествами актуализируют их применение в составе тяговых ЭМС в качестве тяговых генераторов и тяговых электродвигателей.

Среди разработок последнего десятилетия, выполненных с участием авторского коллектива, можно назвать две значимые разработки электротрансмиссий, доведенные до полевых испытаний на объекте - это НИР "Крымск" и ОКР "Платформа".

Электротрансмиссия в рамках НИР Крымск разрабатывалась для восьмиколесного БТР. В состав тяговой ЭМС входили девятифазный тяговый индукторный генератор мощностью 300 кВт, питающий 8 тяговых индукторных двигателей мощностью 35 кВт, построенной по схеме «мотор — полуось». В процессе испытаний макетный образец транспортного средства достиг максимальной скорости 97 км/ч, преодолел подъем 30 градусов на бетонном покрытии, произвел разворот на месте на сухом асфальте с радиусом разворота 3,8 метра. Запас хода по сравнению с механической трансмиссией возрос на 15%.

В рамках ОКР «Платформа» авторским коллективом были разработаны тяговые индукторные электродвигатели с ОВ с векторным управлением мощностью 40 кВт, 60 кВт (мотор-колеса) и 120 кВт (мотор-ось), работающие в составе мотор-редуктора, а также тяговые индукторные генераторы мощностью 1000 кВт и 720 кВт. Электрические машины прошли государственные испытания, документации присвоена литера "О".

В 2016-2017 годах для самосвала "Белаз" грузоподъемностью 90 тонн был разработан и изготовлен на ЗАО "ПТФК "ЗТЭО" (г. Набережные Челны) тяговый индукторный двигатель мощностью 320 кВт (рис.6). Во время объектовых испытаний в карьере, в том числе в условиях пониженной температуры окружающей среды самосвал с новой электротрансмиссией

показал качественную управляемость и надежность в работе, а тяговый электропривод на базе индукторной машины – свою конкурентоспособность с тяговым асинхронным электроприводом российского и зарубежного производства. В настоящее время комплект тягового электрооборудования сейчас поставляется в Белоруссию серийно для установки на новые самосвалы.



Рис. 6. Индукторные двигатели для БелАЗа во время стендовых испытаний

Возможность отдельного регулирования фазного тока и потока позволило реализовать в тяговых электроприводах поддержание постоянства мощности в широком диапазоне частот вращения (до 17:1), что важно при их использовании на мобильных средствах с гибридной силовой установкой при источнике ограниченной мощности, а выбор оптимального соотношения этих токов – обеспечить высокий КПД в широком диапазоне частот вращения и нагрузок, использование алгоритма векторного управления – снизить шум и вибрации.

Электроприводы для нужд ЖКХ

К разработкам с применением в сфере ЖКХ, выполненным с участием авторского коллектива, относится серия мощных многосекционных индукторных двигателей с обмоткой возбуждения мощностью 250, 315, 400, 630 и 1250 кВт. Опытно-промышленная эксплуатация этих двигателей в составе нескольких РТС г.Москвы в течение более 10 лет показала их высокую энергоэффективность и надежность. Например, энергопотребление за год привода дутьевого вентилятора снизилось на 30-50%, а привода дымососа - на 80-95%.

Двигатель мощностью 630 кВт и номинальной частотой вращения 1500 об/мин представляет собой 12-тифазную четырехpaketную ИМ с поднятыми катушками возбуждения, зубцовыми фазными обмотками, имеющую высоту оси вращения 400 мм. Двигатель предназначен для работы в составе регулируемого электропривода, рассчитанного на питание от 4-х инверторов с напряжением до 0,4 кВ и векторным алгоритмом управления. Особенностью данного двигателя является то, что при его работе в составе привода обеспечивается двойная перегрузка по вращающему моменту практически во всем диапазоне частот вращения, а кратковременное отключение двух из четырех инверторов не приводит к уменьшению выходной мощности.

За разработку и внедрение базовой технологии и интеллектуальных электромеханических комплексов для ответственных отраслей и сфер деятельности с жесткими требованиями к надежности и бесперебойности работы Русаков А.М. в составе коллектива разработчиков был награжден Премией Правительства Российской Федерации за 2011 год.

Перечисленные и другие достижения в разработках индукторных машин стали возможными при использовании комплекса расчетных программ, включающих, в том числе, механические расчеты и разработанные авторами программы электромагнитного расчета, основанные на методе эквивалентных схем замещения [9] и программы теплового и гидравлического расчета, а также за счет слаженной работы разработчиков электрических машин, силовой и управляющей части электронных преобразователей.

Применяемые методы позволяют за приемлемое время получить интегральные и мгновенные значения параметров и характеристики, необходимые для принятия решения разработчиков других подсистем и выбрать оптимальные алгоритмы управления.

На рис.7-12 приведен типовой вид основных электрических величин на примере одной из разработок - тягового индукторного электродвигателя (ТЭД) для мобильного средства специального назначения.

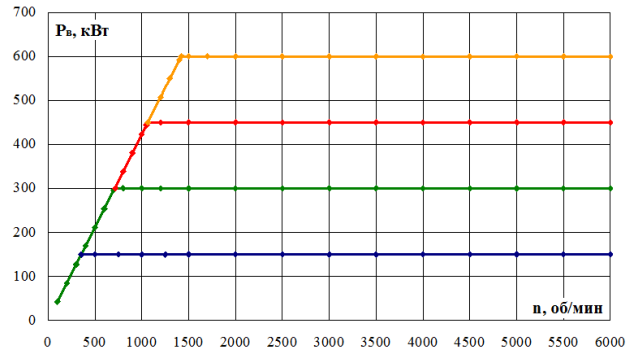


Рис. 7. Мощность на валу ТЭД

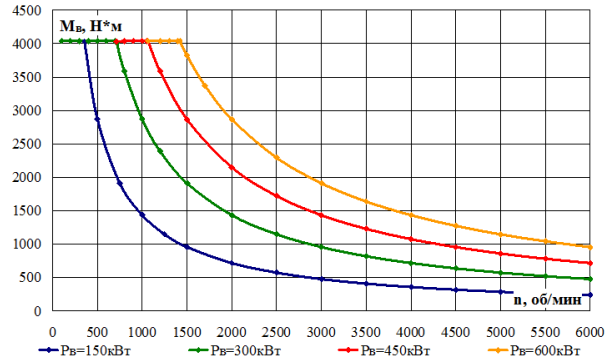


Рис. 8. Момент на валу ТЭД

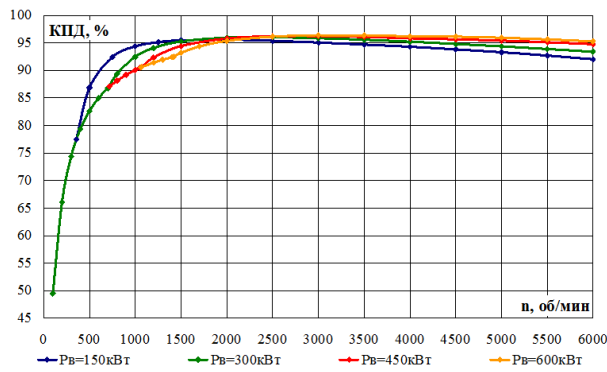


Рис. 9. Коэффициент полезного действия ТЭД

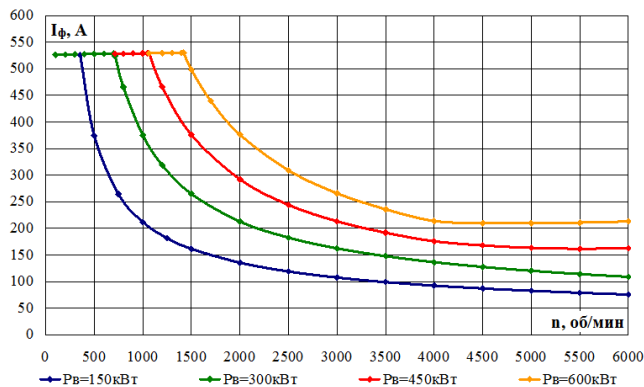


Рис. 10. Фазный ток ТЭД

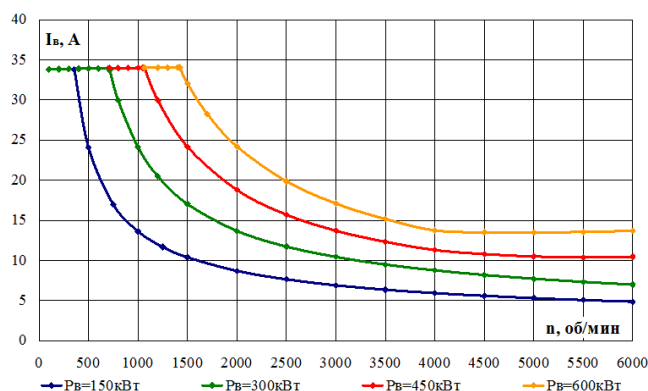


Рис. 11. Ток возбуждения ТЭД

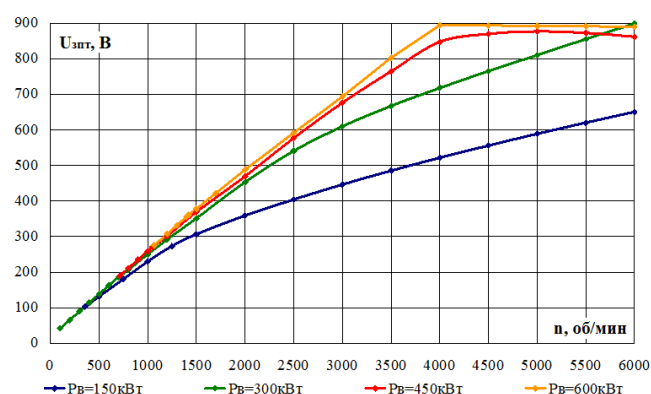


Рис. 12. Напряжение в звене постоянного тока ТЭД

Выводы от достигнутых результатов

Лучшие качества индукторных машин проявляются при их использовании при мощностях более 5 кВт.

Результаты проведенных исследований и опыт конкретных разработок авторов показывают, что во многих случаях применение ОИМ позволяет получить выходные характеристики не хуже, а часто и лучше, чем при использовании традиционно применяемых типов электродвигателей и генераторов, обеспечивая хорошую технологичность изготовления, а поэтому относительно низкую стоимость на изготовление и затрат в эксплуатации, а также высокую надежность и эффективность в работе.

Областями рационального применения ОИМ являются: вентильные генераторы автономных систем электроснабжения; гидрогенераторы для ГЭС (синхронные и вентильные); генераторы ветроэнергетических установок; системы электродвижения судов и приводы вспомогательных механизмов; электротрансмиссии транспортных средств, включая электробусы, метро,

электромобили и железнодорожный транспорт; электроприводы экскаваторов, подъемных кранов, буровых станков и станков-качалок; электроприводы насосов и вентиляторов тяго-дутьевых систем в энергетике и ЖКХ; электроприводы прокатных станков и металлорежущих станков. В этих областях ОИМ становятся конкурентами других типов машин, нашедших к настоящему времени более широкое применение.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Дж.Келли. Очерк развития индукторных генераторов. Электричество, 1897, 5, с.69-72.
2. Жижерин Р.П. Индукторные генераторы. М., - Госэнергоиздат, 1961 – 319с.
3. Алексеева М.М. Машинные генераторы повышенной частоты. М., – Энергия. 1967 – 344с.
4. Альпер Н.Я., Терзян А.А. Индукторные генераторы. М., – Энергия, 1970. – 189с.
5. Домбур Л.Э. Аксиальные индукторные машины. Зинатне, Рига. 1984. 246 с.
6. Балагуров В.А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока. М.: Высшая школа, 1982. - 272 с.
7. Вентильные генераторы автономных систем электроснабжения/Н.М.Рожнов, А.М.Русаков, А.М.Сугробов, П.А.Тырчев. Под ред. П.А.Тырчева – М., Издательство МЭИ, 1996, - 280 с.
8. Проектирование электрических машин автономных объектов: Учебное пособие для вузов/ А.М. Сугробов, А.М.Русаков – М.: Издательский дом МЭИ, 2012 – 304с.
9. Русаков А.М., Окунева Н.А., Соломин А.Н., Шатова И.В. Математическая модель электромагнитных процессов в вентильных двигателях. // Вестник МЭИ, 2007. - № 3. с.33-39.

Сметанин В. В.¹, Денисенко В. И.¹, Лыткин В. В.¹, Бакубаев Б. Т.²,
Мойсейченков А. Н.¹, Луконин Д. А.³

¹УрФУ

²ЗАО «Уралэлектромаш»

³ООО «Русатом-Инжиниринг»

РАЗРАБОТКА РАДИАЦИОННО-СТОЙКИХ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Аннотация: В настоящее время в Российской Федерации в рамках проектного направления «Прорыв» осуществляется создание опытно-демонстрационного энергокомплекса (ОДЭК) на базе реакторной установки БРЕСТ-ОД-300 [1]. Одной из целей ОДЭК является разработка технологий и оборудования позволяющих минимизировать как капитальные, так и эксплуатационные затраты. Одним из источников капитальных затрат является осуществление большого количества проходок в биологической защите радиационно-защитных камер (РЗК) для размещения валов передачи вращающего момента. Для уменьшения данного вида затрат предложено размещать электродвигатели внутри РЗК. В связи с этим появилась задача в разработке электродвигателей способных работать в условиях ионизирующего излучения и высокой дозовой нагрузке, вплоть до 108 Рад.

Ключевые слова: асинхронные двигатели, радиационная безопасность, долговечное оборудование.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день отечественные и зарубежные производители электродвигателей для увеличения срока службы электродвигателя прибегают к усилению такой же органической изоляции (например, с помощью кремня - органического лака КО-916К).

Наиболее заметных результатов достигли зарубежные производители и исследователи: США, Европа, Япония и Китай [1, 2, 3, 4]. Работа в основном направлена на получение прочной изоляции обмоточного провода электродвигателей переменного тока [5]. Производители предлагают как гибридные (соединения органических и неорганических веществ), так и полностью неорганические виды изоляции [3, 6]. Наиболее известные производители: ELANTASPDG, Inc (США), Composite Technology Development, Inc (США), Baldor Electric Company (США), 3М (США), Toshiba (Япония), Hitachi (Япония) [14-17].

II. АНАЛИЗ РАДИАЦИОННО-СТОЙКОЙ И ТЕПЛОСТОЙКОЙ ИЗОЛЯЦИИ

Иностранные компании-производители электродвигателей и исследователи работают в направлении, где изучаются и совершенствуются только сами изоляционные материалы [7]. Основной целью разработки большинства производителей изоляционных материалов является достижение стабильных электроизоляционных свойств и долговечности при высоких температурах и при работе от преобразователя частоты [3].

Для создания радиационно-стойких электродвигателей, как показал анализ систем изоляции двигателей различного назначения зарубежных и отечественных предприятий, наиболее целесообразно использовать изоляцию на основе стеклопластика и полиимидов.

В Англии, Манчестерский университет разработал образцы проволоки с керамической изоляцией, способной выдерживать температуры до 325-450 °С. Изоляция на керамической основе выдерживала температуры, однако существовал фактор плохого покрытия с проявлением частичных разрядов, вредных для изоляции в полостях, а также разрушение от вибраций, нарушающих целостность провода. Также ученые отметили факт низкой гибкости таких проводов [8, 9].

Швейцарское подразделение АВВ разработало керамические изоляторы для изоляции катушек и обмоток возбуждения в синхронных машинах. Представленные ими конструкции отвечали требованиям изоляции низковольтных машин, однако не были устойчивы к высоким температурам и обладали ограниченной способностью формировать необходимые модели [10].

Имеется зарегистрированный патент на проводник с изоляцией из керамики для ручной укладки проводника в канавках статора асинхронного двигателя, однако размеры изолированного провода имеют ограниченные размеры и возможность формирования катушек. В результате проводник имеет плохие эксплуатационные характеристики [11].

При анализе зарубежных источников было установлено, что мировая практика еще не получила долговечной, надежной и эргономичной (а именно, гибкой) изоляции на основе керамических материалов. Кроме того, анализ доступных источников показал, что зарубежным и отечественным компаниям не хватает разработок, связанных с использованием неорганической изоляции для наиболее распространенных электрических машин переменного тока малой и средней мощности (до 100 кВт и напряжения питания до 1000 вольт), которые имеют всыпные обмотки.

Для создания радиационно-стойких электродвигателей, как показал анализ систем изоляции двигателей различного назначения зарубежных и отечественных предприятий, наиболее целесообразно использовать изоляцию на основе стеклопластика и полиимидов.

Один из соответствующих патентов на производство полиимидной изоляции был разработан советскими учеными в 1968 году [23] для разработки электродвигателей, способных к длительной эксплуатации при высоких температурах.

Эмалированные полиимидные медные провода имеют высокую термостойкость. Исследования показывают, что процесс имидизации позволяет эмалированной проволоке выдерживать температуру до 240 °С при непрерывной работе [8]. Такое покрытие или пропитка практически не теряет диэлектрических свойств при повышении температуры по сравнению со стандартной органической изоляцией. Мировая промышленность в первые годы открытия полиимидов была лидером по их производству в лице американской компании, использующей лак Pyre-ML от DuPont [12]. На данный момент существует большое количество производителей и аналогов, в том числе и в России, а именно компания ПсковКабель [13]. Их проводники соответствуют параметрам, представленным в исследованиях полиимидов [9-13].

III. РАЗРАБОТКА ДВИГАТЕЛЯ НА ОСНОВЕ ПОЛИИМИДНОЙ ИЗОЛЯЦИИ

В Центре инноваций и внедрения (ИИК) «Электротехтехноком» Уральского федерального университета совместно с ОАО «ВНИИНМ», ЗАО «Уралэлектромаш» и ООО «РусАтом-Инжиниринг» созданы два опытных образца управляемых радиационно-стойких асинхронных двигателей (ДАР), предназначенных для эксплуатации. Разработан и изготовлен в комплексе дистанционного управления с дистанционным обслуживанием в рамках создания проектной зоны прорыва ОДЭК. Эти электродвигатели могут работать при уровне радиоактивного излучения, достигающем 108 рад и имеющем степень защиты ДАР от внешних воздействий IP Прототип ДАР (Рис.1) был изготовлен на основе электромагнитного сердечника серийных асинхронных двигателей аналогичной мощности и скорости вращения ЗАО «Уралэлектромаш».

Исполнение двигателей по способу защиты от воздействия внешней среды – IP 68 предполагает полную герметичность конструкции корпуса. В связи с этим задний подшипниковый щит выполнен «глухим», то есть двигатель имеет один конец выходного вала на переднем щите с использованием уплотнения на основе радиационно-стойкого граффлекса, подпрессованного пружиной.



Рис. 1. Прототип двигателя ДАР-2.2



Рис. 2. Прототип двигателя ДАР-0.75

Особенностью системы охлаждения двигателя является комбинированное охлаждение. Станина, в которую впрессован сердечник статора с обмоткой, имеет рубашку с впускным и выпускным патрубками для подачи охлаждающей воды. Кожух жидкостного охладителя и подшипниковые щиты двигателя имеют естественный теплообмен с окружающей химически агрессивной средой, температура которой достигает $+ 800^{\circ}\text{C}$ [1].

IV. АНАЛИЗ ТЕПЛОВОГО СОСТОЯНИЯ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЯ

Зависимость температуры от расхода воды с учетом естественного теплообмена корпуса с окружающей средой для наиболее нагретой части обмотки статора определяет выбор класса изоляции машины, конструкцию подшипниковых щитов, определяет выбор смазки подшипников и температуру воды на выходе из охладителя [2].

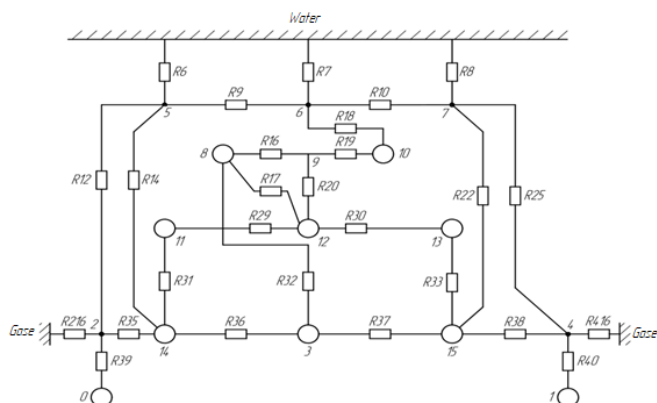


Рис. 3. Тепловая схема ДАР

Результаты зависимости температуры от расхода воды с учетом естественного теплообмена корпуса с окружающей средой представлены на рисунке 3 для наиболее нагретой части обмотки статора (узлы 11, 12 и 13), которая определяет выбор класса изоляции машины, конструкцию подшипниковых щитов, которая определяет выбор смазки подшипников и температуру воды на выходе из охладителя [2].

Оценено тепловое состояние радиационно-стойкого асинхронного двигателя с классическим электромагнитным сердечником с изоляционными материалами на основе полиимидов. Метод теплового расчета основан на методе эквивалентных тепловых цепей (ETS) и решении системы уравнений в матричной форме для 16 узлов в среде MathCad. Источники тепла контура определяются на основе электромагнитного расчета по стандартной методике серийных двигателей.

Особый вопрос теплового состояния установившихся режимов работы в камере радиационной защиты заключается в нагреве электродвигателя как от окружающей среды, так и от охлаждающей жидкости, которая имеет более высокую температуру, чем в начале работы. Выполненная тепловая оценка процесса нагрева корпуса рассматривалась приблизительно путем увеличения температуры воды на входе в охладитель на величину температуры нагрева шаг за шагом, которая соответствует суммарному тепловому потоку через внешние поверхности. Величину составляющих этого потока определяли методом последовательных приближений по разности температур между соответствующими поверхностями и окружающей средой.

В результате исследования было установлено, что увеличение скорости потока по отношению к принятому проекту не даст существенного улучшения охлаждения. Как показали расчеты, уровень нагрева изоляции обмотки статора, а также подшипниковых узлов с радиационно-стойкой смазкой не превышает допустимых значений температуры для примененных материалов указанных элементов конструкции опытных образцов ДАР.

Следует отметить, что расход воды составляет 0,12 л / с, и этот расход полностью соответствует техническим требованиям двигателя.

Для охлаждения электродвигателя ДАР-0,75 была реализована проточная схема охлаждения посредством подачи холодной воды водоснабжения и слива обратной воды в канализацию.

В ходе ресурсных испытаний: расход воды охлаждения поддерживался в диапазоне 25 ± 2 л/час по ротаметру РМС-025 ЖУС ГОСТ13045-81; температура теплоносителя на входе была в диапазоне от 17 до 23 °С на выходе от 18 до 25 °С; температура окружающей среды в помещении была в диапазоне от 19 до 25 °С; разница температуры теплоносителя на входе выходе была от 1 до 2 °С.

До ресурсных испытаний, с целью определения точек измерения температуры была произведена съемка распределения тепла в инфракрасном излучении Рис.4-5 с помощью тепловизора.



Рис. 4. Стенд ресурсных испытаний ДАР



Рис. 5. ДАР в инфракрасном свете

V. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате разработки и производства были проведены испытания опытных образцов ДАР в ЗАО «Уралэлектромаш» при питании от сети в соответствии с полной стандартной программой испытаний, по которой испытывают новые конструкции асинхронных двигателей для межведомственной приемки у новой продукции.

Испытания опытных образцов радиационно-стойких электродвигателей в составе электропривода (с системой управления) проведены в научно-исследовательской лаборатории кафедры электрических машин ИВЦ «Электромехтехноком» УрФУ.

Стендовые испытания опытных образцов ДАР, проведенные в испытательной лаборатории ЗАО «Уралэлектромаш» и в ИВЦ «Электромехтехноком», подтвердили, что разработанные двигатели по электромагнитным параметрам, тепловым, энергетическим и пусковым характеристикам полностью соответствуют серийным асинхронным двигателям аналогичной мощности и частоты вращения, выпускаемых ЗАО «Уралэлектромаш», и удовлетворяют требованиям технического задания, предъявляемым к двигателям. Разработанные опытные образцы в ближайшее время на одном из предприятий ГК «Росатом» будут испытаны на работоспособность в условиях непрерывного облучения с дозовой нагрузкой до 108 Рад (106 Грей).

На сегодняшний день существует еще 3 разработки двигателей новой конструкции и способов формирования магнитных полей с применением радиационно-стойких материалов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A.Y. Shadrin, K.N. Dvoeglazov, O.A. Ustinov, [etc.] Ph process as a technology for reprocessing mixed uranium-plutonium fuel from brest-od-300 reactor. // Radiochemistry. – 2016. – V. 58. – Issue 3. – P.271-279.
2. Mera, G. Ceramic nanocomposites from Tailor-made preceramic polymers / G. Mera, M. Gallei, S. Bernard, E. Ionescu // Nanomaterials. – 2015. – 2 (5). – pp. 468-540

3. Maitra, S. Nanoceramic matrix composites: types, processing and applications / S. Maitra // *Advances in ceramic matrix composites*. – 2014. – 45. – pp. 27-52
4. Wang, S.F. Transparent ceramics: Processing, materials and applications / S.F. Wang, J. Zhang, D.W. Luo, F. Gu, D.Y. Tang, Z.L. Dong, G.E.B. Tan, W.X. Que, T.S. Zhang, S. Li, L.B. Kong // *Progress in solid state chemistry*. – 2013. – 1-2 (41). – pp. 20-54.
5. Matizanhuka, W.R. Spark plasma sintering (SPS) – an advanced sintering technique for structural nanocomposite materials / W.R. Matizanhuka // *Journal of the southern African institute of mining and metallurgy*. – 2016. – 12 (116). – pp. 1171-1180
6. Palmero, P. Structural ceramic nanocomposites: a review of properties and powder's synthesis methods / P. Palmero // *Nanomaterials*. – 2015. – 2 (5). – pp. 656-6966.
7. I. Loschakov Introduction to dosimetry and protection against ionizing radiation / I. I. Loschakov. - St. Petersburg: Publishing House of the Polytechnic University, 2008. - 145 p.
8. Non-destructive testing. Radiation flaw detection methods. Application area. [Text]: GOST 20426-82. Ed. Apr 1991 rev. 1 (IMS. 1993. No. 2). - Instead of GOST 20426-75; enter 02/05/1982
9. National Institute of Standards and Technology. Physical Meas. Laboratory [electronic resource]: database. - Access mode: <https://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html> (Date accessed: 06/12/2019)
10. Available: <http://home.process.com/Intranets/wp2.htm>
11. Klimanov V. A. A collection of problems on the theory of transfer, dosimetry and protection against ionizing radiation: a training manual / A. A. Zvantsev, V. A. Klimanov, A. I. Ksenofontov et al.; under the editorship of V.A. Klimanova. - M.: NRNU MEPhI, 2011. - 196 p.
12. RF patent 2547682. A method of obtaining an electrical insulating coating on the surface of an electrically conductive material / Baranov M.V., Denisenko V.I., Lukonin D.A., Nikulin S.L., Plastun A.T. / priority from 10/09/2013, registration 03/16/2015
13. Baranov, M.V. Nano-oxide materials for increasing the operational characteristics of AC machines / M.V. Baranov, A.R. Beketov, V.I. Denisenko, A.T. Plastun, A.R. Gayfutdinov D.A. Lukonin, Sh.D. Gudaev // *Proceedings of the Sverdlovsk Research Institute of Chemical Engineering*. - 2013. -- 20 (84). - from. 68-72
14. Patent RU 287296, C08g 20/32 Method for the production of polyimides / A. N. Pravednikov, E. N. Teleshov and I. V. Vasilieva / Application number No. 1288273 / 23-5, application filing date 10.12.68, patent publication: 27.10.1971
15. Mayofis I.M. Chemistry of dielectrics, Textbook for students of energy specialties of universities. - M.: Higher School, 1970. - 332 p.
16. Ivanova, O. Additive manufacturing (AM) and nanotechnology: promises and challenges / O. Ivanova, C. Williams, T. Campbell // *Rapid prototyping journal*. – 2013. – 5 (19). – pp. 353-364
17. High Temperature Nanocomposite Insulation for High Power Density Machines, Weijun Yin, Kevin Flanagan, Rian Zhao, Dave Artus, Charles Sigler, Xiaochuan Jia, Hao Huang, GE Aviation Systems Dayton, OH 45409, USA and GE Global Research Center Niskayuna, NY12309, USA, 2013
18. Assessment and Improvements of Inorganic Insulation for High Temperature Low Voltage Motors, Vadim Iosif, Daniel Roger, Stéphane Duchesne Univ. Artois, Laboratoire Systèmes Electrotechniques et Environnement (LSEE) - EA4025 Technoparc Futura, F62400 Bethune, France
19. Viswanathan, V. Challenges and advances in nanocomposite processing techniques / V. Viswanathan, T. Laha, K. Balani, A. Agarwal, S. Seal // *Materials science and engineering reports*. – 2006. – 5-6 (54). – pp. 121-285
20. High Temperature Nanocomposite Insulation for High Power Density Machines, Weijun Yin, Kevin Flanagan, Rian Zhao, Dave Artus, Charles Sigler, Xiaochuan Jia, Hao Huang, GE Aviation Systems Dayton, OH 45409, USA and GE Global Research Center Niskayuna, NY12309, USA, 2013

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ПОВЫШАЮЩЕГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЭНЕРГИИ¹

Аннотация: В данной статье рассматривается проблема электромагнитной совместимости. В начале статьи приводится имитационная модель и параметры повышающего DC/DC преобразователя. Далее проводится схема и параметры фильтра электромагнитных помех. Рассматриваются несколько моделей фильтрации электромагнитных помех преобразователя. В конце приводится сравнительная таблица результатов моделирования.

Ключевые слова: электромагнитные помехи, шум, повышающий преобразователь.

I. ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время идет активное развитие летательных аппаратов: беспилотные аппараты, гражданская и военная авиации, электрические самолеты, летающие лаборатории, квадрокоптеры и т.д., которые должны обладать четкой и непрерывной работой, поскольку от этого зависит обеспечение потребностей людей, народного хозяйства и обороны страны. Успешное решение задач, поставленных перед авиацией, обеспечивается оснащением ее новыми типами самолетов и вертолетов, новыми бортовыми комплексами пилотажно-навигационного оборудования, наземными автоматизированными системами управления воздушным движением [1].

Решение задач не может обойтись без использования радиоэлектронных аппаратуры (РЭА). Минусом является то, что из-за применения большого количества РЭА происходит перенасыщение радиочастотного пространства электромагнитными излучениями во всем диапазоне частот. Воздействие помех на РЭА со стороны внешних элементов ограничивает эффективность совместной работы всей системы.

Современное радиоэлектронное оборудование (РЭО) гражданской авиации (ГА) - сложные комплексы радиотехнических устройств и систем, являющихся основными информационно-измерительными устройствами как на

¹Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых, тема «АП-ЭМ-02-21-ГБ».

борту воздушного судна (ВС), так и в системах управления воздушным движением (УВД).

Степень снижения достоверности и своевременности представления информации со стороны РЭА экипажам ВС и (или) диспетчерскому составу службы движения может привести к снижению уровня безопасности полетов. Значительное количество предпосылок к летным происшествиям вызвано сложной электромагнитной обстановке, в которой функционирует РЭО ГА, а также неправильной эксплуатацией РЭО в сложной электромагнитной обстановке.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

В традиционной методологии проектирования проблемы ЭМС решаются после создания прототипа. На данном этапе традиционные средства защиты от электромагнитных помех сводятся к добавлению дополнительных компонентов, металлических экранов, металлических плоскостей или даже к перепроектированию системы в целом, что оказывает существенное влияние как на стоимость, так и на сроки вывода продукции на рынок. Поэтому необходимо ЭМС устранять как можно раньше на этапе проектирования.

Рассмотрим имитационную модель повышающего DC/DC преобразователя, параметры которого приведены в табл. 1, на наличие электромагнитных помех методом быстрого преобразования Фурье (БПФ).

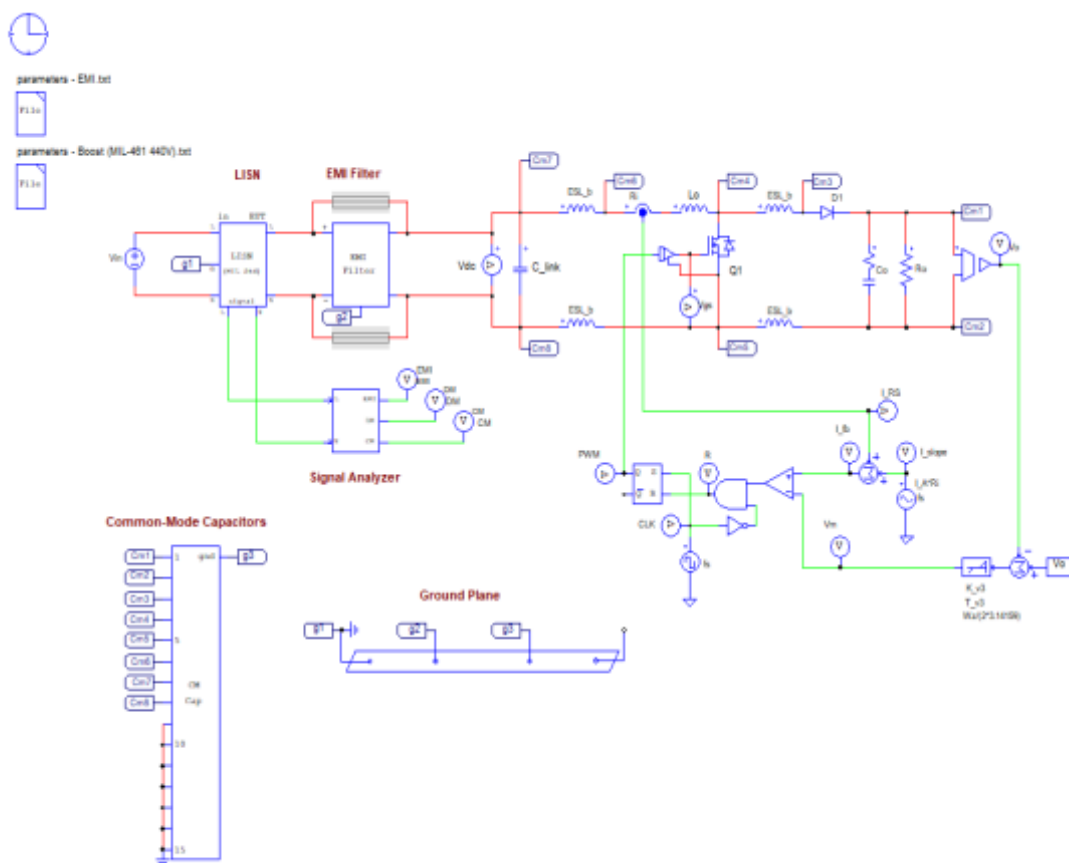


Рис. 1. Имитационная модель повышающего DC/DC преобразователя

Блок «*Common-Mod Capacitors*» необходим для подключения синфазных конденсаторов для имитации электромагнитных помех. Он содержит 15 конденсаторов, подключенных к узлу "gnd". А узел "gnd" должен быть подключен к плоскости заземления. В данной схеме используются Cm1... Cm15, подключенные на "gnd"[10].

Таблица 1

Параметры системы повышающего преобразователя

Наименование	Значение
<i>I</i>	2
Входное напряжение, В	$V_{in} = 115$
Выходное напряжение, В	$V_o = 300$
Выходная мощность, кВт	$P_o = 1$
Коэффициент усиления датчика тока	$K_i = 0.1$
Коэффициент усиления датчика напряжения	$K_v = 1$
Эквивалентное последовательное сопротивление, мОм	$R_{Co} = 10$

1	2
Эквивалентное последовательное сопротивление, мОм	$R_{Lo} = 0$
Частота переключения, кГц	$f_{sw} = 200$
Эквивалентное последовательное сопротивление фильтрующего конденсатора, мОм	$RC_link = 20$
Емкость фильтрующего конденсатора, мкФ	$C_link = 500$
Эквивалентная последовательная индуктивность, нГн	$ESL_b = 20$
Эквивалентная последовательная индуктивность переключения, нГн	$ESL_s = 5$
Выходной ток, А	$I_o = 16,7$
Выходное сопротивление, Ом	$R_o = 18$
Скважность импульса	$D = 0.62$
Выходная индуктивность, мкГн	$L_o = 53$
Выходная емкость, мФ	$C_0 = 1$

Для защиты системы от электромагнитных помех внутри системы необходимо построить схему фильтрации от ЭМП. Данная схема представлена на рис. 2.

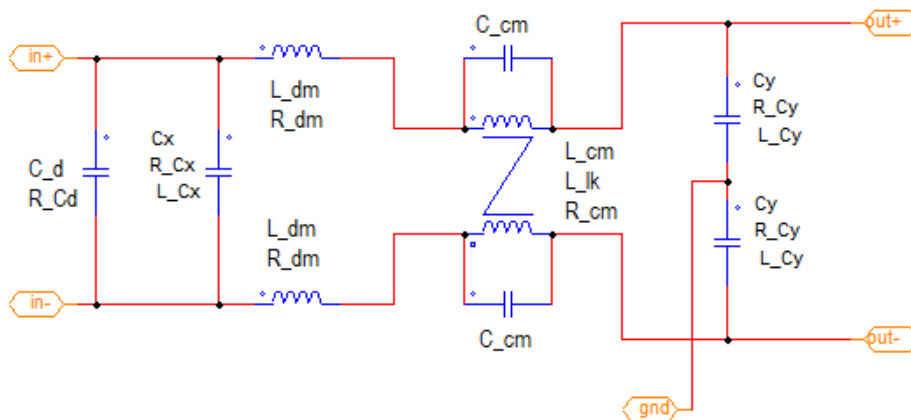


Рис. 2. Схема фильтра ЭМП

Рассмотрим несколько моделей фильтрации электромагнитных помех:

А. При отсутствии фильтра ЭМП

При моделировании имитационной модели получились результаты, не соответствующие стандарту Mil-Std 461 для 115 В в интервале частот от 250 кГц до 10 МГц. Значения синфазных помех, превышает стандарт практически на 20 дБ/мкВ, что является недопустимым. Значения дифференциальных помех

превышает стандарт при 250 кГц на 20 дБ/мкВ. Значения электромагнитных помех превышает на 20 дБ/мкВ на интервале частот от 250 кГц до 10 МГц.

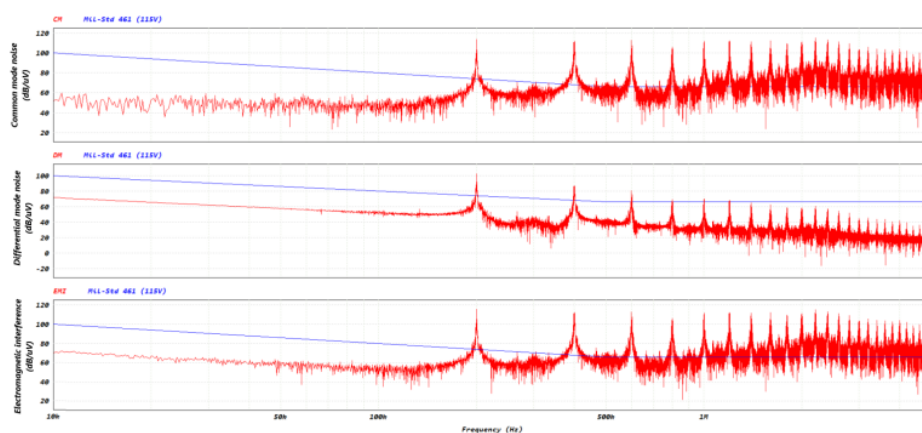


Рис. 3. Электромагнитные помехи при отсутствии фильтра ЭМП: а – синфазный режим; б – дифференциальный режим; в – помехоэмиссия

В. При включенном в схему фильтра электромагнитных помех
 Параметры фильтра электромагнитных помех приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры фильтра электромагнитных помех

Наименование	Значение
1	2
Входная емкость фильтра ЭМП (дифф. режим), мкФ	$C_x = 4.7$
Выходная емкость фильтра ЭМП (синфаз. режим), мкФ	$C_y = 4.7$
Эквивалентное последовательное сопротивление C_x , Ом	$RC_x = 0$
Эквивалентная последовательная индуктивность C_x , Гн	$LC_x = 0$
Эквивалентное последовательное сопротивление C_y , Ом	$RC_y = 0$
Эквивалентная последовательная индуктивность C_y , Гн	$LC_y = 0$
Сопротивление обмотки синфазного дросселя, Ом	$R_{cm} = 0.0001$
Емкость обмотки синфазного дросселя, мкФ	$C_{cm} = 0$
Сопротивление дифференциального режима, Ом	$R_{dm} = 0.0001$
Демпфирующая емкость, мкФ	$C_d = 0$
Эквивалентное последовательное сопротивление демпфирующей емкости, Ом	$RC_d = 0$

1	2
Емкости синфазных помех, Ф	Ccm1 = 7E-10; Ccm2 = 7E-10; Ccm3 = 1E-10; Ccm4 = 1E-10; Ccm5 = 2E-10; Ccm6 = 2E-10; Ccm7 = 1E-10; Ccm8 = 1E-10; Ccm9 = 1E-10; Ccm10 = 1E-10; Ccm11 = 1E-10; Ccm12 = 1E-10; Ccm13 = 1E-10; Ccm14 = 1E-10; Ccm15 = 1E-10;
Наименьшая частота шума СМ, при которой стандарт ЕМІ выходит из строя, Гц	fcm_EMI = 200000
Амплитуда синфазных помех, дБ/мкВ	Amp_cm_EMI = 102;
Амплитуда стандарта синфазных помех, дБ/мкВ	Amp_cm_EMI_Std = 80
Наименьшая частота шума ДМ, при которой стандарт ЕМІ выходит из строя	freq_dm_EMI = 200000;
Амплитуда дифференциальных помех, дБ/мкВ	Amp_dm_EMI = 97;
Амплитуда стандарта дифференциальных помех, дБ/мкВ	Amp_dm_EMI_Std = 80;
Частота среза синфазного режима, Гц	fc_cm = 39905.25
Частота среза дифференциального режима, Гц	fc_dm = 53214.5
Индуктивность синфазного дросселя, мкГн	L_cm = 0,18
Индуктивность утечки синфазного дросселя, нГн	L_leakage = 8.9
Индуктивность дифференциального дросселя, мкГн	L_dm = 0.86

Как можно заметить ЭМП снизились ниже стандартного уровня, но присутствуют всплески помех дифференциального режима и электромагнитной эмиссии, для уменьшения необходимо изменить параметры фильтров дифференциального режима, например, увеличить индуктивность L_{dm} . Также увеличим индуктивность L_{cm} для уменьшения синфазных помех.

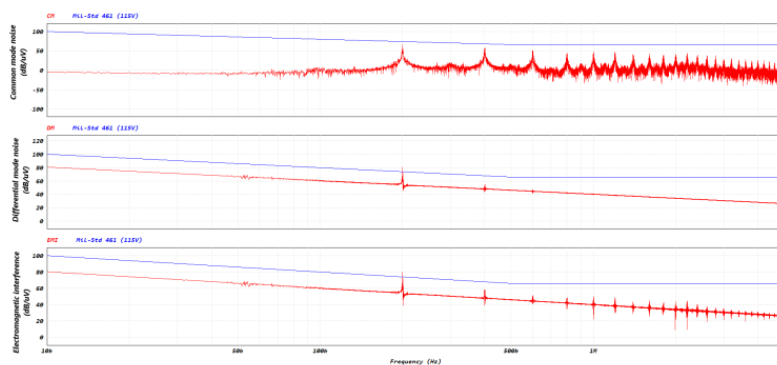


Рис. 4. Электромагнитные помехи при включенном в схему фильтром электромагнитных помех:
а – синфазный режим; б – дифференциальный режим; в – помехоэмиссия

Как можно заметить ЭМП снизились ниже стандартного уровня, но присутствуют всплески помех дифференциального режима и электромагнитной эмиссии, для уменьшения необходимо изменить параметры фильтров дифференциального режима, например, увеличить индуктивность L_{dm} . Также увеличим индуктивность L_{cm} для уменьшения синфазных помех.

С. При включенном в схему фильтром электромагнитных помех при увеличении L_{dm} и L_{cm} .

Параметры индуктивностей приведены в табл. 3.

Таблица 3

Параметры L_{dm} и L_{cm}

Наименование	Значение
Индуктивность синфазного дросселя, мкГн	$L_{cm} = 1.8$
Индуктивность дифференциального дросселя, мкГн	$L_{dm} = 8.6$

При увеличении индуктивностей произошло снижение всех помех ниже стандартного значения (рис. 2.5). Пиковое значение синфазных помех составило 50 дБ/мкВ, Дифференциальные помехи по мере увеличении частоты снижаются, но сохраняют всплески помех, решением послужит увеличение емкости конденсатора C_x , пиковое значение приходится на 20 кГц. Значения помехоэмиссии также снижается по мере увеличения частоты, пиковое значение приходится также на 20 кГц. Также стоит отметить, что при увеличении индуктивностей произошел рост шумов на частоте 20 кГц и решением данной проблемы послужит увеличение емкостей C_x и C_y .

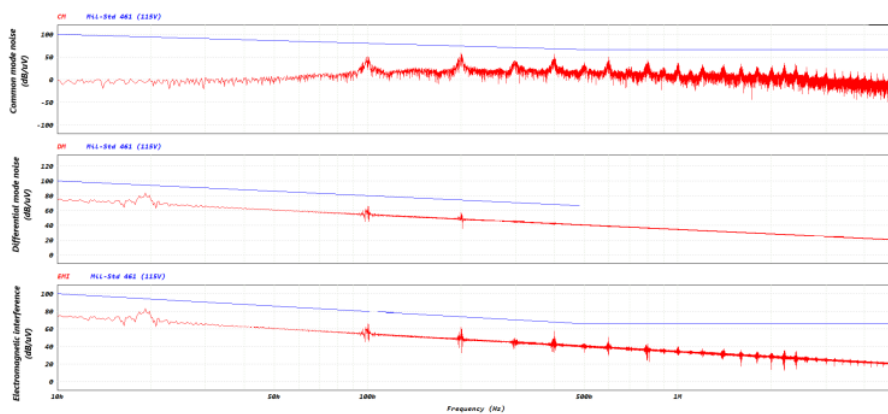


Рис. 5. Электромагнитные помехи при включенном в схему фильтром электромагнитных помех с увеличенными значениями L_{cm} , L_{dm} : *a* – синфазный режим; *б* – дифференциальный режим; *в* – помехоэмиссия

Для уменьшения шума, преобладающих на низких частотах, изменим значения C_x и C_y

D. При включенном в схему фильтром электромагнитных помех при тех же параметрах системы, но с увеличенными C_x и C_y до 47 мкФ.

Результаты моделирования приведены на рис. 6.

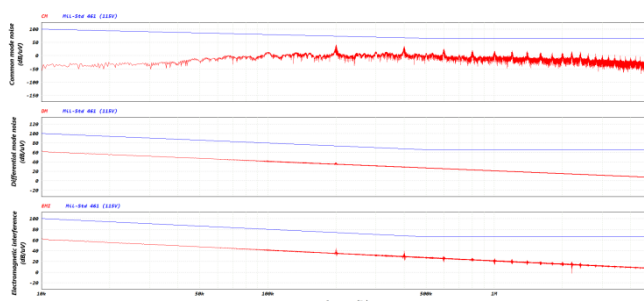


Рис. 6. Электромагнитные помехи при включенном в схему фильтром электромагнитных помех с увеличенными значениями C_x и C_y : *a* – синфазный режим; *б* – дифференциальный режим; *в* – помехоэмиссия

В низкочастотном диапазоне шумы были отфильтрованы. В диапазоне средних и высоких частот уровень помех снизился на 20 дБ/мкВ.

Следовательно, для наилучшей фильтрации помех повышающего DC/DC преобразователя на всех частотных диапазонах необходимо увеличить C_x и C_y до 47 мкФ, значения индуктивностей L_{cm} и L_{dm} увеличить до значений 1.8 мкГн и 8.6 мкГн соответственно.

Рассмотрим еще один случай, при котором параметры индуктивностей остаются первоначальными, но при этом увеличим емкость фильтрующего конденсатора $C_{link} = 1$ мФ (рис. 7).

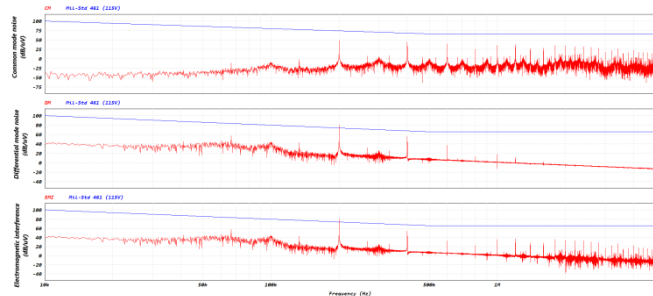


Рис. 7. Электромагнитные помехи при включенном в схему фильтром электромагнитных помех с увеличенными значениями

Увеличение фильтрующей емкости C_{link} привело лишь к увеличению дифференциальных помех и помехоэмиссии на всем частотном диапазоне. Всплески помех достигают 80 дБ/мкВ и превышает стандарт, следовательно, увеличение фильтрующей емкости без увеличения индуктивностей L_{cm} и L_{dm} нецелесообразно.

Результаты исследования приведены в табл. 4.

Таблица 4

Условия ЭМП	Без фильтра ЭМП	С фильтром ЭМП (табл. 2.1)	С фильтром ЭМП (табл. 2.2)	С фильтро м ЭМП (табл. 2.3)	С фильтром ЭМП При $C_{link} =$ 1мФ	Mil-STD 461 (115V)
CM , дБ/мкВ	110	70	60	50	50	70
DM , дБ/мкВ	100	80	70	40	80	76
EMI , дБ/мкВ	110	80	60	40	80	80

Сравнение результатов моделирования при 250 кГц.

Исходя из результатов, представленных в табл. IV наилучшим способом уменьшения помех является добавление в цепь фильтра ЭМП конденсаторов

Сх, Су равными 47 мкФ, а также индуктивностей L_{cm} и L_{dm} равными 1,78 мкГн и 8,63 мкГн, поскольку при таких параметрах уровень помех не превышает допустимых стандартом значений.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Стукалов С.Б. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных систем: учебное пособие. / С.Б. Стукалов. — Воронеж: ООО «МИР», 2019. — 64 с.
2. PSIM User's Guide Version 2020a Release 1 [Электронный ресурс]. — URL: <https://powersimtech.com/wp-content/uploads/2021/01/PSIM-User-Manual.pdf>

Тамалинцев Н. В., Кобзов Д. В., Юсуфов Т. А., Меднов А. А.
ПИШ «Моторы будущего»

ОСОБЕННОСТИ КОНСТРУКЦИИ И ЭКСПЛУАТАЦИИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН, ИСПОЛЬЗУЕМЫХ В АРКТИЧЕСКОЙ ЗОНЕ РФ¹

Аннотация: Статья посвящена актуальной теме, конструированию и применению электрических машин для условий арктической зоны Российской Федерации. В статье рассмотрены основные климатические факторы, влияющие на конструкцию и эксплуатацию электрических машин, конструкционные и расходные материалы, необходимые для их исправной работы.

Ключевые слова: арктическая зона, электрические машины, работоспособность, климатическое исполнение.

I. ВВЕДЕНИЕ

Освоение богатых природными ресурсами и обладающих большим промышленным потенциалом территорий арктической зоны Российской Федерации потребовало создания электрооборудования, способного исправно работать в экстремальных природно-климатических условиях. Значительная часть Российской Федерации расположена в зоне холодного климата. Указом президента РФ от 26 октября 2020 г. №645 “О стратегии развития арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года” перед промышленностью поставлена задача обеспечить территории арктической зоны техникой, способной безотказно работать при

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0838-2020-0006.

низких температурах и прочих климатических факторах, оказывающих влияние на ее работоспособность.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

A. Общая информация

Основной задачей при проектировании электрической машины для условий арктической зоны является обеспечение сохранности ее параметров и работоспособности. Исполнение машины должно соответствовать микроклиматическому району, в котором она будет использоваться. Климатические районы делятся в зависимости от средних ежегодных максимумов и минимумов температуры воздуха, места расположения района и относительной влажности.

В таблице 1 представлены климатические исполнения и категории размещения наиболее популярные среди электрических машин в арктической зоне.

Таблица 1

Климатическое исполнение

Климатическое исполнение	Категория размещения	Рабочая температура, °С		Максимальное значение относительно влажности, %
		Верхнее значение	Нижнее значение	
У	1,2	+40	-45	100 при 25°С
У	3	+40	-45	98 при 25°С
УХЛ	4	+35	+1	80 при 25°С
Т	2	+50	-10	100 при 25°С
ХЛ, УХЛ	1,2	+40	-60	100 при 25°С

У – Умеренный климат

УХЛ – Умеренный и холодный климат

Т – Сухой и влажный тропический климат

ХЛ – Холодный климат

Машины в исполнении У и УХЛ имеют возможность эксплуатации в жарких зонах, при условии, что средний ежегодный максимум температуры не превышает 40 °С и (или) комбинация из температуры воздуха 20 °С (или выше), и относительной влажности 80 % (или выше), непрерывно наблюдается более 12 часов в сутки в течение 2 месяцев в году.

Если машину предполагается использовать в районе с холодным климатом и экономически нецелесообразно ее использование за пределами этого района, вместо обозначения УХЛ рекомендуется обозначать ХЛ.



Рис. 1. Месторождения полезных ископаемых в арктической зоне РФ

При эксплуатации электрических машин в арктической зоне, они попадают под влияние неблагоприятных климатических факторов, наибольшее влияние оказывают: воздействие низких температур, суточный и годовой перепад температур, влажность и сильный ветер.

Затраты на эксплуатацию техники в условиях холодного климата возрастают в 2-3 раза, по сравнению со средней полосой России, ввиду ее неприспособленности. Климат на территории России от субтропического до арктического. Участки России с преимущественной температурой зимой -200С и ниже, с учетом скорости ветра, составляют 60% от общей площади страны.

Арктическая зона занимает 28% от общей площади РФ. Арктическая зона богата природными ресурсами, в ее пределах работает несколько десятков крупных горнодобывающих предприятий.

Климат арктической зоны России резко континентальный с продолжительной зимой и коротким летом. Абсолютный максимум температур (+35°C) был зарегистрирован в июле, абсолютный минимум (-60°C) – в январе. Уровень влажности резко меняется в зависимости от сезона — 30–40% летом и до 90% зимой.

Как показывает практика, амплитуда колебаний воздуха оказывает прямое влияние на частоту отказа электрических машин. С увеличением амплитуды, растет и количество отказов.

Низкие температуры в сочетании с высокой влажностью оказывают негативное влияние на надежность работы оборудования. Отказы машин и оборудования, произошедшие под воздействием низких температур, называют низкотемпературными отказами. Низкие температуры оказывают значительное влияние на все элементы надежности машин: безотказность, работоспособность, долговечность, ремонтпригодность.

Вследствие воздействия низких температур:

- 1) Падает ударная вязкость металла.
- 2) Полимерные материалы отвердевают и становятся хрупкими.
- 3) Смазочные материалы густеют, их смазочные свойства снижаются.
- 4) Замерзает конденсат.
- 5) В механизмы попадает снег, и происходит обледенение.

Проанализировав основные причины снижения надежности электрических машин при низких температурах, можно выделить наиболее эффективные методы по борьбе с ними, такие как:

- 1) Конструктивно-расчетные.
- 2) Технологические.
- 3) Эксплуатационные.

Под эксплуатационными, понимаются методы, не требующие каких-либо изменений в конструкции и осуществимые при эксплуатации машины. К ним относятся:

- 1) Применение маловязких низкотемпературных смазок и масел.
- 2) Применение низкотемпературных охлаждающих жидкостей.
- 3) Очистка открытых узлов и механизмов от снега и льда.
- 4) Строгое выполнение технических условий.

В. Меры, принимаемые для обеспечения нормальной работы в условиях низких температур

Пазовые клинья предпочтительно изготавливать из прессованных пластмасс (например АГ-4, ТВФЭ-2), стеклотекстолита (СТК-41, СТК-41/ЭП, СТК-41-У, ГОСТ 12652-74) и профильных стеклопластиков, также допустимо применение гетинакса.

Применение медной обмотки ротора позволит улучшить характеристики электродвигателя в условиях низкой температуры и повысить его КПД, по сравнению с аналогичной обмоткой из алюминия, что благоприятно скажется на энергоэффективности электродвигателя и повысит экологичность электропривода, если он, например, находится в составе гибридной силовой установке карьерных самосвалов, которые широко применяются на горнодобывающих предприятиях.

В соответствии с ГОСТ Р 53615-2009, электрические машины исполнения ХЛ не требуют специальных мер защиты от солнечной радиации, так как суммарная солнечная радиация в арктической зоне в 2—2,5 раза меньше, чем, например в тропиках, а перегрев невозможен из-за низких температур окружающего.

При поглощении или конденсации влаги поверхностное и объемное сопротивление изоляционных материалов существенно снижается, и увеличиваются диэлектрические потери. При сильном насыщении влагой увеличивается диэлектрическая проницаемость материалов и снижение их электрической прочности.

При одновременном воздействии напряжения и влаги возможно появления проводящих мостиков, на поверхности изоляции.

Конструктивно, изоляция электрических машин в исполнении ХЛ не имеет существенных отличий от машины в исполнении для умеренного климата.

Однако, при выборе пропиточных лаков необходимо учесть их температуру растрескивания и уровень адгезии с металлом при низких температурах в соответствии с ГОСТ 17491-80. Эпоксидно-полиэфирные (ЭД-6, Э-40) и кремний-органические (ГКЖ-94, К-41, ВФЭ-2) лаки хорошо подходят по этим показателям.

В соответствии с ГОСТ 6323-79, для исполнения ХЛ применяются те же марки проводов, что и для умеренного климата.

Для пазовой изоляции можно использовать слой гибкого стекломиканита (Г1ФГ) и слой стеклолакоткани (ЛСЭ-1, ЛСЭ-19, ЛСБ, ЛСТЧ), склеиваемые лаком (ГФ-95)Стеклолакоткань на выходе из паза должна огибать стекломиканит и заходить в паз на 8—15 мм. Вышеупомянутые материалы можно применить и для изоляции лобовых частей.

Дополнительным слоем стеклоткани (ЛСБ, ЛС-К) изолируются места пайки. Все соединения изолируют стеклолентой аналогичных марок, пропитанной в лаке (МГМ-8, ФЛ-98, АФ-17).

Защита от пыли и снега (снежной пыли) производится по классификации защиты IPXX, в соответствии с ГОСТ 14254-2015 (IEC 60529.2013).

Методы для защиты от влаги применимы так же и для защиты от снежной пыли, например: установка принудительной вентиляции, дополнительные уплотнения и герметизация. Чтобы не допустить скопления осадков, корпус выполняется как можно более гладким , без раковин и царапин, рекомендуется отказаться от различных углублений и зазоров, наибольшее влияние оказывают «мертвые пространства», места откуда затруднено естественное выдувание пыли и влаги.

При выборе материалов учитывается их подверженность расширению, сжатию и повышению хрупкости при низких температурах.

Многие материалы подвержены усадке при низких температурах, смазки загустевают, движущиеся детали заедают (вследствие сжатия), изменяются константы упругости и прочности, конденсируется влага и образуется лед, что может привести к короткому замыканию, резиновая и пластмассовая изоляция теряют эластичность, из-за чего на ней появляются трещины, меняются электрические характеристики машины из-за изменения размеров, ухудшается проводимость контактов покрытых льдом, изменяются магнитные характеристики, увеличивается коэффициент трения вследствие изменения вязкости смазки и т.д.

По мере снижения температуры вязкость смазочных материалов увеличивается, что необходимо учесть при их выборе. Например, для эксплуатации в условиях арктической зоны, основываясь на ГОСТ 23258-78, подойдут следующие смазки:

ВНИИНП-280, применяется в подшипниках качения, резьбовых соединениях, шпинделях. Рабочая температура -60°C до $+150^{\circ}\text{C}$.

Jet Lube 33, область применения: подшипники и оборудование, работающее при очень низких температурах. Рабочая температура -76°C до $+204^{\circ}\text{C}$.

Смазка СЭДА (ТУ 38.1011242-89). Рабочая температура $-60\dots+120^{\circ}\text{C}$.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Указ Президента Российской Федерации “О Стратегии развития Арктической зоны Российской Федерации и обеспечения национальной безопасности на период до 2035 года” от 26.10.2020 № 645 2020
2. Брайан Кин, Кин Применение электротехнического оборудования при низких температурах / Кин Брайан Кин, Шварц Герхард, Турнхерр Петер. 2013. – 7 с. Дата просмотра 12.11.2022
http://www.eaton.ru/ecm/groups/public/@pub/@eatonru/@corp/documents/content/pct_1200479.pdf.
3. Налбандов, В.Л. Работоспособность оборудования в условиях Крайнего Севера / В.Л. Налбандов. – Ухта : , 1992. – 59 с.

4. Синтетические смазки для северных и арктических условий эксплуатации. 2016. Дата просмотра 10.11.2022 <https://tpgargo.ru/press-czentr/blog/sinteticheskie-smazki-dlya-severnyh-i-arcticheskikh-usloviy>.
5. Обзор современных консистентных смазок для низких температур. 2018. Дата просмотра 13.11.2022 <https://www.nordtech.ru/smazki-low.htm>.

Уразбахтин Р. Р.¹, Юсуфов Т. А.²

¹ФГБОУ ВО «УУНиТ»

²ПИШ «Моторы Будущего»

ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ ИНТЕГРИРОВАННОГО СТАРТЕРА-ГЕНЕРАТОРА В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ РАБОТЫ¹

Аннотация: В настоящей работе рассматривается функционирование интегрированного стартера-генератора в двигательном режиме работы при запуске двухконтурного турбореактивного двигателя. Коротко рассматривается процесс запуска двухконтурного турбореактивного двигателя. Выделяются особенности запуска двухконтурного турбореактивного двигателя при помощи интегрированного стартера-генератора. Рассматривается моментная характеристика интегрированного стартера-генератора при запуске двухконтурного турбореактивного двигателя. Формируются рекомендации по определению момента при проектировании интегрированного стартера-генератора для двухконтурного турбореактивного двигателя.

Ключевые слова: интегрированный стартер-генератор, двигательный режим работы, моментная характеристика, двухконтурный турбореактивный двигатель, запуск двухконтурного турбореактивного двигателя.

I. ВВЕДЕНИЕ

Двухконтурные турбореактивные двигатели (ТРДД) получили широкое распространение на самолетах гражданской и боевой авиации благодаря обеспечению высокой тяги за счет внешнего контура. В настоящий момент возможности по улучшению характеристик ТРДД практически исчерпаны, что обусловлено ограничениями свойств материалов и конструктивными особенностями ТРДД. Однако, удельные характеристики электродвигателей, которые являются потенциальной заменой традиционных ТРДД, ниже удельных характеристик ТРДД. На фоне стремления авиакомпаний снизить расходы на эксплуатацию летательных аппаратов (ЛА) и ожесточающихся

¹Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых, тема «АП-ЭМ-02-21-ГБ».

требований к экологичности ЛА при невозможности замены ТРДД на электродвигатели появились концепции полностью электрического самолета (ПЭС) [1] и более электрического самолета (БЭС) [2]. Одной из ключевых технологий в рамках концепций БЭС и ПЭС является интегрированный стартер-генератор (ИСГ).

ИСГ – электрическая машина (ЭМ), которая позволяет произвести запуск авиационного двигателя и вырабатывать электроэнергию во время полета ЛА. Отличительной особенностью ИСГ является его расположение непосредственно внутри авиационного двигателя, в рассматриваемом случае – непосредственно внутри ТРДД. За счет расположения ИСГ непосредственно внутри ТРДД становится возможно отказаться от отбора механической и пневматической от ТРДД. Это позволяет повысить эффективность ТРДД. При этом, агрегаты авиационного двигателя и оборудование на ЛА должны быть электрифицированы.

Анализ научно-технической литературы показал, что перспективным является выполнение ИСГ на основе ЭМ с ПМ [3-6]. Для ЭМ с ПМ существует возможность обеспечения отказоустойчивости. Разработаны конструктивно выполнимые с учетом интеграции в ТРДД эффективные методы охлаждения ЭМ с ПМ. ЭМ с ПМ обладают надежной бесконтактной конструкцией, позволяющей добиться высокой удельной мощности при невысоких массе и габаритах.

В настоящей статье рассматривается запуск ТРДД при помощи ИСГ и особенности функционирования ИСГ в двигательном режиме работы.

II. ОСНОВНЫЕ АСПЕКТЫ ТЕОРИИ ЗАПУСКА ДВУХКОНТУРНОГО ТУРБОРЕАКТИВНОГО ДВИГАТЕЛЯ ПРИ ПОМОЩИ ИНТЕГРИРОВАННОГО СТАРТЕРА-ГЕНЕРАТОРА

Особенностью запуска ТРДД является необходимость раскрутить его ротор высокого давления (РВД) при помощи вспомогательного устройства от неподвижного состояния на земле или от режима авторотации в полете до режима малого газа. РВД – вал ТРДД, на котором закреплены компрессор и

турбина высокого давления (ТВД). Ротор ИСГ жестко закреплен на РВД, поэтому момент от ИСГ напрямую передается на РВД. Режим малого газа – режим работы ТРДД, при котором обороты поддерживаются на минимальном уровне, достаточном для поддержания устойчивой и надежной работы. РВД раскручивается пусковым устройством (ПУ) до той частоты вращения, при которой в камеру сгорания поступает достаточное количество воздуха для поддержания устойчивого горения топливовоздушной смеси. Далее вращение РВД поддерживается за счет сжигания топливовоздушной смеси, то есть выходит на режим малого газа. В рассматриваемом случае ИСГ является ПУ и обеспечивает раскрутку РВД. На рис. 1 представлены этапы запуска ТРДД при помощи ИСГ.

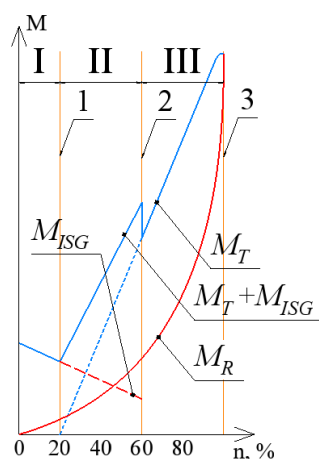


Рис. 1. Этапы запуска ТРДД при помощи ИСГ:

M_T – момент, развиваемый турбиной высокого давления (ТВД); M_{ISG} – момент, развиваемый ИСГ при работе в двигательном режиме; M_R – момент сопротивления ТРДД

Воздух в камеру сгорания ТРДД подается компрессором высокого давления (КВД). На рис. 1 цифрами I, II и III обозначены этапы запуска авиационного двигателя. На I этапе мощность ИСГ расходуется на преодоление момента сопротивления ТРДД. В момент времени 1 начинается сжигание топливовоздушной смеси в камере сгорания ТРДД. На II этапе мощность ИСГ также расходуется на преодоление момента сопротивления ТРДД, но при этом ТВД включается в работу и вместе с ИСГ участвует в преодолении момента сопротивления ТРДД. В момент времени 2 ИСГ переключается на

генераторный режим работы и перестает участвовать в преодолении момента сопротивления ТРДД. На III этапе запуска ТВД преодолевает момент сопротивления ТРДД, обороты ТРДД повышаются до уровня n_s , при котором ТРДД может самостоятельно устойчиво работать. Момент времени 3 соответствует моменту выхода ТРДД на режим малого газа.

Согласно рис. 1, ИСГ работает в двигательном режиме на I и II этапах запуска ТРДД. Переключение между двигательным и генераторным режимами работы ИСГ осуществляется за счет электроники. Момент переключения ИСГ с двигательного на генераторный режим, показанный на рис. 1 линией 2, может определяться, например, частотой вращения РВД. Если момент времени 2 соответствует скорости вращения РВД 7500 об/мин, вышесказанное можно интерпретировать: ИСГ переключается с двигательного на генераторный режим работы при скорости вращения РВД 7500 об/мин.

Минимальная мощность ИСГ в двигательном режиме работы на I этапе запуска ТРДД может быть определена согласно следующему выражению:

$$N_{ISG} = N_j - N_{HPK},$$

где: N_j – мощность, расходуемая на ускорение РВД; N_{HPK} – мощность, расходуемая на вращение КВД.

Минимальная мощность ИСГ в двигательном режиме работы на II этапе запуска ТРДД может быть определена согласно следующему выражению:

$$N_{ISG} = N_j - (N_{HPT} - N_{HPK}),$$

где: N_{HPT} – мощность, развиваемая ТВД.

Мощность ИСГ в двигательном режиме работы на I и II этапах запуска ТРДД, определяемая по приведенным выше выражениям, является предварительной, и в дальнейшем должна уточняться с учетом необходимости обеспечить надежный запуск ТРДД на различных этапах полета.

III. ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ИНТЕГРИРОВАННОГО СТАРТЕРА-ГЕНЕРАТОРА ПРИ РАБОТЕ В ДВИГАТЕЛЬНОМ РЕЖИМЕ

Ранее было отмечено, что ИСГ представляет собой ЭМ С ПМ. ЭМ с ПМ при работе в двигательном режиме управляется от регулируемого полупроводникового инвертора. При необходимости поддерживать заданный постоянный момент при заданной частоте вращения полупроводниковый инвертор регулирует напряжение, которое подается на ИСГ. Напряжение на входе инвертора при этом поддерживается постоянным на уровне постоянного напряжения системы электроснабжения (СЭС) ЛА, что обусловлено осуществлением питания инвертора от аккумуляторной батареи во время запуска ТРДД. За счет регулирования напряжения ИСГ инвертором до определенной частоты вращения поддерживается постоянный необходимый уровень выходного момента. Таким образом, за счет повышения напряжения ИСГ достигается постоянство момента ИСГ при увеличении скорости вращения ротора ИСГ от 0 до n_{cr} . Скорость вращения ротора ИСГ n_{cr} – это скорость вращения ротора, после достижения которой увеличение напряжение ИСГ не позволяет поддерживать момент на необходимом уровне. То есть, после достижения n_{cr} скорость вращения ротора ИСГ продолжает расти, но момент при этом начинает падать. Это обусловлено тем, что мощность и напряжение на выходе полупроводникового инвертора ограничены. Соответственно, по достижению максимально возможного напряжения инвертора частота вращения ИСГ будет продолжать увеличиваться, но момент при этом будет падать. Когда напряжения инвертора достаточно для обеспечения необходимого момента ИСГ в двигательном режиме работы, ток ИСГ в основном представляет собой ток по оси q . В целом, для при поддержании необходимого заданного момента ИСГ в двигательном режиме необходимо максимизировать ток по оси q . Когда напряжение на выходе инвертора достигает своего максимально допустимого значения, происходит перераспределение тока ИСГ по осям d и q , что приводит к уменьшению

момента ИСГ при возрастании его частоты вращения. График момента ИСГ при работе в двигательном режиме показан на рис. 2.

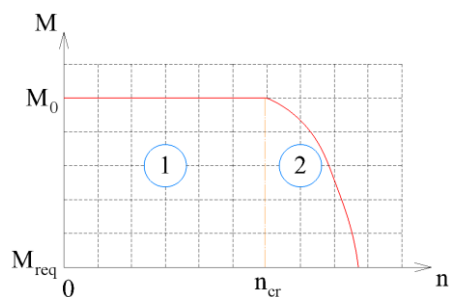


Рис. 2. Момент ИСГ при работе в двигательном режиме:
 M_{req} – минимальная величина момента, требуемая для запуска ТРДД

Величина момента M_{req} при работе ИСГ в двигательном режиме определяется исходя из того, какую величину момента должен развивать ИСГ в двигательном режиме работы к концу II этапа запуска ТРДД, что определяется параметрами ТРДД, запуск которого осуществляется при помощи ИСГ.

Соответственно, на I и II этапах запуска ТРДД момент, развиваемый ИСГ в двигательном режиме работы, должен превышать M_{req} .

В работе [7] был разработан ИСГ для двухконтурного турбореактивного двигателя. В настоящей работе для более подробного рассмотрения функционирования ИСГ в двигательном режиме рассчитывается и моделируется ИСГ на основе ЭМ с ПМ, при этом параметры запуска ТРДД берутся из работы [7]. В таблице 1 приведены параметры рассчитанного ИСГ.

Таблица 1

Параметры рассчитанного ИСГ

Параметр	Значение
1	2
Тип обмотки	зубцовая
Количество фаз	3
Число пазов	72
Число полюсов	24
Частота перемагничивания, Гц	740
Материал магнитопровода статора	Сталь 2421

1	2
Внутренний диаметр магнитопровода статора, мм	436
Немагнитный зазор, мм	3,4
Материал ротора	Сталь 30ХГСА
Материал ПМ	SmCo, рабочая температура 270 °С
Толщина ПМ, мм	9
Число параллельных ветвей обмотки	3
Число витков в одной фазе	1
Диаметр элементарного проводника, мм	0,6
Плотность тока, А/мм ²	14,545
Линейная токовая нагрузка, А/м	20919,1
Масса активной части, кг	239,648
Электромагнитный КПД, %	98,8992

Для рассчитанного ИСГ была построена моментная характеристика, ограничение по номинальному напряжению на выходе инвертора – 350 В. Зависимость момента ИСГ в двигательном режиме работы от скорости вращения ротора представлена на рис. 3.

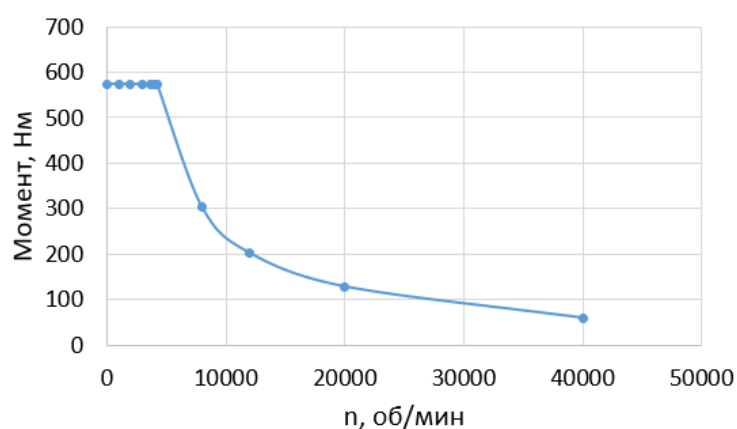


Рис. 3. Зависимость момента ИСГ в двигательном режиме работы от скорости вращения ротора

Габаритные размеры ИСГ и внутренний диаметр ротора ИСГ выбраны исходя из размеров области, в которой размещается ТРДД. Для запуска ТРДД, представленного в [7], ИСГ должен развивать момент не менее 550 Н·м при частоте вращения до 3700 об/мин. Рассчитанный ИСГ на основе ЭМ с ПМ обеспечивает момент 574,3 Н·м при частоте вращения ротора до 4250 об/мин.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе были приведены основные аспекты теории запуска ИСГ при помощи ТРДД. Приведены кривые запуска ТРДД, получены выражения для предварительного определения мощности ИСГ в двигательном режиме и рассмотрена моментная характеристика ИСГ при работе в двигательном режиме.

Очевидно, что запуск ИСГ при помощи ТРДД является сложным мультидисциплинарным процессом, который необходимо продолжать исследовать для формирования подходов к проектированию ИСГ, минимизирующих риски невозможности запуска ТРДД при помощи ИСГ.

Будущая работа будет направлена на определение времени работы ИСГ при запуске ТРДД в целях определения возможности работы ИСГ в перегрузочном двигательном режиме, на окончательное определение мощности ИСГ в двигательном режиме, на формирование методов обеспечения запуска ТРДД при помощи ИСГ в различных условиях, на оценку эффективности запуска ТРДД при помощи ИСГ, а также на исследование вывода ТРДД на режим малого газа при помощи ИСГ и работу ТРДД с ИСГ на режиме малого газа.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. A. W. Schäfer et al., “Technological, economic and environmental prospects of all-electric aircraft” in *Nature Energy*, vol. IV, no 2, pp. 160-166.
2. B. Sarlioglu, C. T. Morris, “More electric aircraft: Review, challenges, and opportunities for commercial transport aircraft” in *IEEE transactions on Transportation Electrification*, vol. 1, no 1, pp. 54-64, 2015.
3. B. Wang, Y. Liu, G. Vakil, T. Yang and Z. Zhang, “Feasibility of Permanent Magnet Fault Tolerant Machines for Aircraft Starter/Generator Systems” in *2020 International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 2020, pp. 2104-2110, doi: 10.1109/ICEM49940.2020.9270965.
4. F. R. Ismagilov, V. Y. Vavilov, V. I. Bekuzin and V. V. Ayguzina, “Rotor Magnetic Systems of the Permanent-Magnet Starter-Generator for Vehicles with a Hybrid Power Plant” 2018 XIV International Scientific-Technical Conference on Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 2018, pp. 134-138, doi: 10.1109/APEIE.2018.8545646.
5. A. La Rocca, S. J. Pickering, C. Eastwick and C. Gerada, “Enhanced cooling for an electric starter-generator for aerospace application” in *7th IET International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (PEMD 2014)*, 2014, pp. 1-7, doi: 10.1049/cp.2014.0373.

6. J. K. Nøland, M. Leandro, J. A. Suul and M. Molinas, “High-Power Machines and Starter-Generator Topologies for More Electric Aircraft: A Technology Outlook” in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 130104-130123, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3007791.
7. E. Clarke, *Circuit Analysis of AC Power Systems*, vol. I. New York: Wiley, 1950, p. 81.
8. S. Rjckard, M. Robert, R. David *Integrate Engine- generator concept for aircraft electric secondary power national aeronautics and space administration*. /Washington, D. C.: NASATM X- 2579, 1972

Фазлиахметов Д. М., Фаррахова Р. А.
ФГБОУ ВО «УУНиТ»

ИССЛЕДОВАНИЕ ДАТЧИКОВ ТОКА С СЕРДЕЧНИКАМИ ИЗ ФЕРРОМАГНИТНОГО МАТЕРИАЛА, АМОРФНОГО ЖЕЛЕЗА И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЙ СТАЛИ¹

Аннотация: В данной статье приведены уравнения для описания электромагнитных процессов в сердечнике, для величины немагнитного зазора, для выходного напряжения на датчике Холла и для максимального возможного измеренного тока. Приведены характеристики сердечников из ферромагнитного материала, аморфного железа и электротехнической стали для их сравнения.

Ключевые слова: датчик тока, ферромагнитный материал, аморфное железо, электротехническая сталь.

I. ВВЕДЕНИЕ

Одной из главных физических величин является сила тока, точное измерение которой влияет на обнаружение неисправностей, а также помогает локализовать их. Датчики являются органами чувств любой системы управления, чтобы функционировать исправно и выполнять свои функции. Обратная связь необходима электродвигателю, чтобы поддерживать номинальные момент и количество оборотов. Для обратной связи в электрических машинах часто используют силу тока.

В настоящее время используются разные материалы и конструкции для того, чтобы получить максимальные производительность и быстродействие при минимальных габаритах и стоимости.

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

II. ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Датчик тока на эффекте Холла представляет собой кольцевой сердечник, через который пропускают проводник с измеряемым током. Если проводник с измеряемым током пропущен через кольцо, то число витков равно единице [1]-[8].

Выбор магнитопровода для датчика тока зависит от геометрических размеров, относительной магнитной проницаемости материала, полюсы пропускания и индукции насыщения материала. Часто используют ферритовые материалы, такие как РС40, РЗ, М2000НМ1, Н10КТ, М6000НМ [9]. Ферриты – это соединения двойных окислов железа и одно-двухвалентных металлов, которые обладают свойствами ферромагнетиков. Данный керамический материал получается спеканием компонентов в виде порошков [10].

Также в качестве материала магнитопровода часто используют аморфное железо. Для сравнения характеристик выберем материал из аморфного железа АМАГ186В [10], [11]. АМАГ186В имеет относительную магнитную проницаемость 2200 и магнитную индукцию 0,9 Тл. Диапазон температур сердечника из аморфного материала АМАГ186В составляет от -60 до 120°С. Подбор химического состава и использование особой технологии охлаждения, является причиной аморфного состояния. Охлаждение происходит со скоростью выше критической, которая уже известна для определенного состава. Отсутствие дефектов в структуре приводит к тому, что аморфное железо превосходит по прочности многие легированные стали. Аморфные сплавы обладают износостойкостью, коррозионной стойкостью и высокой твердостью. В агрессивных условиях эти материалы не корродируют. Коррозионная стойкость обусловлена оксидной пленкой, которая образуется на поверхности сплава на начальном этапе коррозионного процесса, что в дальнейшем защищает металл от контакта с агрессивной средой. У сплавов отсутствует кристаллическая решетка, а значит у них нет дислокаций. Сейчас производят аморфные сплавы в виде лент толщиной менее 40 мкм [11].

В качестве альтернативного материала для магнитопровода датчика тока можно использовать электротехническую сталь. Датчик тока на эффекте холла изображен на рисунке 1.

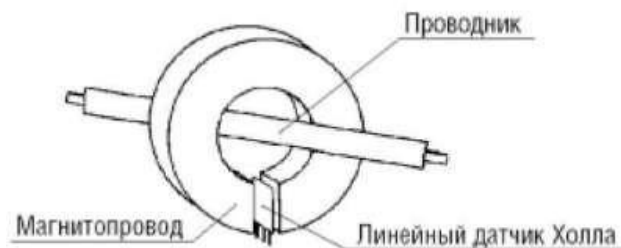


Рис. 1. Датчик тока на эффекте Холла

Электромагнитные уравнения, описывающие электромагнитные процессы в сердечнике из стали, аморфного железа или ферритового материала и в воздушном зазоре одинаковы.

$$i w = H l_{\text{ср}} + H_{\delta} \delta \quad (1)$$

$$B = \mu_0 \mu_r H \quad (2)$$

где i – измеряемый ток, w – количество витков, H – напряженность магнитного поля в сердечнике, $l_{\text{ср}}$ – длина средней линии сердечника, H_{δ} – напряженность магнитного поля в воздушном зазоре, δ – величина воздушного зазора, B – величина магнитной индукции, μ_0 – начальная магнитная проницаемость, μ_r – относительная магнитная проницаемость.

Учитывая уравнение 2 уравнение 1 примет вид:

$$i w = \frac{B l_{\text{ср}}}{\mu_0} \left(\frac{1}{\mu_r} + \frac{\delta}{l_{\text{ср}}} \right). \quad (3)$$

Необходимый воздушный зазор:

$$\delta = l_{\text{ср}} \frac{\mu_r - \mu_e}{\mu_r \mu_e}. \quad (4)$$

Индукция в воздушном зазоре:

$$B = i \frac{\mu_0 \mu_r \omega}{l_{\text{ср}}}. \quad (5)$$

Диапазон индукции в зазоре ограничен датчиком на эффекте Холла. В качестве датчика можно устанавливать разные линейные датчики Холла. Например, линейный датчик Холла устанавливается в зазор сердечника. В качестве датчика холла возьмем микросхему SS490 от Honeywell. Она имеет три вывода: сигнал, питание и общий. Максимальная измеряемая индукция составляет 42 мТл, а нелинейность в диапазоне от -37,5 Тл до 37,5 мТл не превышает 1,5%. Номинальная чувствительность датчика на эффекте Холла SS490 составляет около 50 мВ/Тл. При номинальной индукции составляет от 2,26 до 2,74 с номинальным значением 2,5 В, значит дрейф нуля $\pm 0\%,064/^\circ\text{C}$ в диапазоне температур от -40 до +125°C. Передаточная характеристика и чертеж датчика SS494 представлены на рисунке 2 и на рисунке 3 [12].

Выходное напряжение на датчике Холла пропорционально индукции в воздушном зазоре, которая зависит от измеряемого тока.

$$u_0 = U_0 + iS_{u_0|i} \quad (6)$$

где U_0 – напряжение при нулевом токе, $S_{(u_0|i)}$ – чувствительность датчика тока, i – измеряемый ток.

Для повышения чувствительности проводник с измеряемым током может иметь несколько витков.

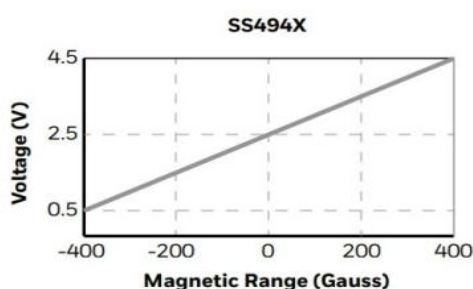


Рис. 2. Передаточная характеристика датчиков Холла серии SS494

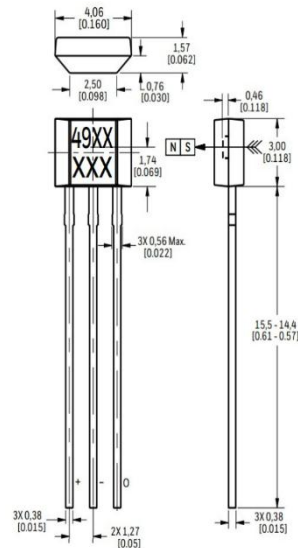


Рис. 3. Датчик Холла серии SS490

Максимальный ток, который можно измерить, будет не сильно отличаться при схожих размерах сердечников из аморфного железа, электротехнической стали при равных длине средней линии и величине зазора, так как его можно посчитать по формуле:

$$i_{max} = B_m \frac{l_{cp} + \delta \mu_r}{\mu_0 \mu_r \omega}. \quad (7)$$

Сравним характеристики магнитопроводов из аморфного железа, ферромагнитного материала и электротехнической стали. Выберем в качестве сердечника из аморфного железа материала с характеристиками приведенными в таблице 1. Магнитопровод из аморфного железа изображен на рисунке 4. Он собран из пластин разной длины, вырезанных из листов, в которых обычно поставляется аморфное железо, и скручены в тороидальную форму.



Рис. 4. Сердечник из ленты аморфного железа АМАГ

Таблица 1

Характеристика сердечника из аморфного железа АМАГ186В

Параметр	Значение
Внешний диаметр, мм	12
Внутренний диаметр, мм	8
Высота, мм	3
Длина средней линии, мм	31,4
Магнитная проницаемость	1900
Индукция насыщения сердечника, Тл	0,9

В качестве сердечника из электротехнической стали выберем сердечник, изготовленный из стали 2421 с характеристиками приведенными в таблице 2[13], [14]. Сердечник из стали, что набирается из листов, вырезанных на станке, и склеиваются, изображен на рисунке 5.

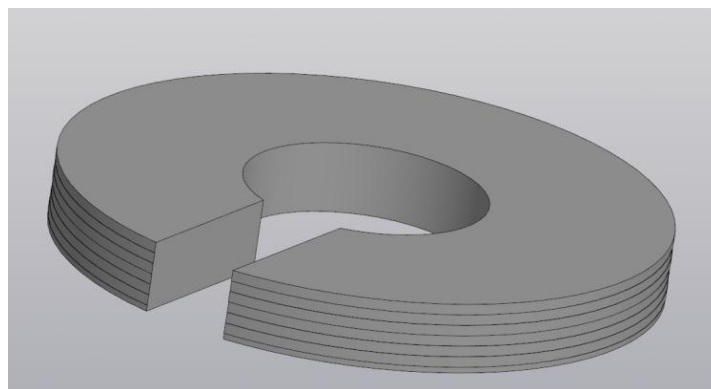


Рис. 5. Сердечник из стали 2421

Характеристика сердечника из стали 2421

Параметр	Значение
Внешний диаметр, мм	12
Внутренний диаметр, мм	8
Высота, мм	3
Длина средней линии, мм	31,4
Магнитная проницаемость	2000
Индукция насыщения сердечника, Тл	1,01

В качестве сердечника из ферромагнитного материала выберем М2000НМ, характеристики которого приведены в таблице 3. Изображение ферритового кольца из материала М2000НМ приведено на рисунке 6.



Рис. 6. Ферритовое кольцо из М2000НМ

Характеристика сердечника из ферромагнитного материала М2000НМ

Параметр	Значение
Внешний диаметр, мм	12
Внутренний диаметр, мм	8
Высота, мм	3
Длина средней линии, мм	31,4
Магнитная проницаемость	2000
Индукция насыщения сердечника, Тл	0,4

У всех сердечников отличается индукция насыщения сердечника, но так как фактическая индукция будет зависеть от датчика на эффекте Холла, поэтому индукция фактическая в разы меньше индукции насыщения сердечника. Магнитная проницаемость у аморфного железа немного меньше, чем у ферромагнитного сердечника и сердечника из стали, что также незначительно скажется при проектировании датчика тока.

Каждый датчик имеет свою полосу пропускания, в диапазоне которого амплитудно-частотная характеристика сигнала равномерна. За пределами полосы пропускания форма сигнала сильно искажается. Полосу пропускания часто называют эффективно передаваемая полоса частот. Ширина полосы пропускания измеряется в единицах частоты Гц, неравномерность АЧХ в дБ. При проектировании каждого датчика тока это необходимо учитывать. Для электротехнической стали это сотни Гц, для аморфного железа это сотни кГц, для ферритового материала МГц.

Перспективно будет собрать несколько линейных датчиков тока с сердечником из каждого материала из разных партий, а также исследовать сердечники из пермаллоя. Также проверить как появление компенсационной обмотки повлияет на характеристики линейного датчика тока.

III. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Были приведены характеристики магнитопроводов из ферромагнитного материала, аморфного железа АМАГ186В и из электротехнической стали 2421. Так как отличия не значительны, то нужно выбирать материал, который дешевле и проще в обработке. Также стоит уделить внимание, что выбранный материал влияет на быстродействие датчика, так что нужно учитывать полосу пропускания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Magnetic cores for hall effect devices // Magnetics URL: https://elnamagnetics.com/wp-content/uploads/library/Magnetics-Documents/Magnetic_Cores_for_Hall_Effect_Devices.
2. Решения LEM в области преобразования электрических параметров для железнодорожного транспорта // LEM URL: <https://www.lem.com/ru/file/4453>.
3. What is a Hall effect sensor // RS Components URL: <https://se.rs-online.com/web/generalDisplay.html?id=ideas-and-advice/hall-effect-sensors-guide>.
4. Клименко, К. А. Сравнительный анализ современных датчиков тока / К. А. Клименко. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2011. — № 8 (31). — Т. 1. — С. 66-68. — URL: <https://moluch.ru/archive/31/3552>.
5. Г. ПОРТНОЙ Современные магниточувствительные датчики Холла и приборы на их основе // ВЕСТНИК Автоматизации. - 2013. - №1. - С. 7-12.
6. Г. Волович Интегральные датчики Холла // СОВРЕМЕННАЯ ЭЛЕКТРОНИКА . - 2004. - №12. - С. 26-31.
7. Hall Effect Sensor // Electronics Tutorials URL: <https://www.electronicstutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>
8. Supplier of Soft Magnetic Components // Magnetics URL: <https://www.mag-inc.com>.
9. Ферриты (оксиферы) // Sterbrust URL: <https://sterbrust.tech/spravochnik/materialovedenie/ferrity.html>
10. Сердечники из аморфных и нанокристаллических сплавов // Лэпкос URL: <https://ferrite.ru/docs/serdechniki-iz-amorfnykh-i-nanokristallicheskikh-splavov/>.
11. Аморфные и нанокристаллические магнитомягкие материалы // Mstator URL: <https://www.mstator.ru/ru/products/amag>.
12. SS490 // Компэл URL: <https://www.compel.ru/series/HONEY/SS490>
13. Характеристика материала 2421 // МАРОЧНИК СТАЛИ И СПЛАВОВ URL: http://www.splav-kharkov.com/mat_start.php?name_id=2383.
14. Сталь электротехническая сернистая // ЛЕНСТАЛЬИНВЕСТ URL: <https://lenst.su/marki-staley/stal-elektrotexnicheskaya/stal-elektrotexnicheskaya-sernistaya/2421>.

Яшин А. Н., Бодылев А. С., Хакимьянов М. И.
УГНТУ

ЭНЕРГОЭФФЕКТИВНЫЙ АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ СКВАЖИННОГО ШТАНГОВОГО ГЛУБИННОГО НАСОСА

Аннотация: В настоящее время нефтедобывающие предприятия стремятся сократить свои издержки, тем самым снижая себестоимость добываемой из скважин нефти. Значительную часть в себестоимости нефти составляют затраты на электроэнергию, потребляемую электродвигателями штанговых глубинных насосов. Поэтому повышается интерес к разработкам интеллектуальных станций управления приводами скважинных насосов, которые позволяют контролировать расход электроэнергии и обеспечивать экономичные режимы эксплуатации. В статье авторы предлагают алгоритм управления частотно-регулируемым электроприводом штангового глубинного насоса, позволяющий находить и поддерживать режим эксплуатации скважины с минимальным удельным расходом электроэнергии на добычу единицы скважинной жидкости.

Ключевые слова: штанговый глубинный насос, скважина, частотно-регулируемый электропривод, удельный расход электроэнергии, экономичный режим эксплуатации.

I. ВВЕДЕНИЕ

Скважинная добыча нефти является достаточно сложным и энергозатратным технологическим процессом [1]. Как показывает практика, затраты электроэнергии на добычу 1 м³ скважинной жидкости в условиях нашей страны составляют от 5 до 50 кВт·ч и выше [2]. На это влияют уровень жидкости в скважине, вязкость и плотность скважинного флюида, технологические параметры скважины. Кроме того, дополнительные потери возникают при наличии утечек в клапанах насоса, в колонне насосно-компрессорных труб, парафиновых отложений, разбалансированности противовесов станка-качалки, повышенном трении в подшипниках и редукторе установки, а также других причин [3], [4]. Поэтому в условиях нестабильных постоянно меняющихся цен на баррель нефти и растущих цен на электроэнергию требуется обеспечить эксплуатацию скважин с минимальными удельными затратами электроэнергии.

II. ОБОРУДОВАНИЕ УСТАНОВОК СКВАЖИННЫХ ШТАНГОВЫХ ГЛУБИННЫХ НАСОСОВ

Схема оборудования установок скважинных штанговых глубинных насосов (ШГН) приведена на рис. 1. Чтобы обеспечить интеллектуальное управление режимом эксплуатации скважинная установка должна быть обеспечена датчиками: динамометрирования и ваттметрирования [5], [6].

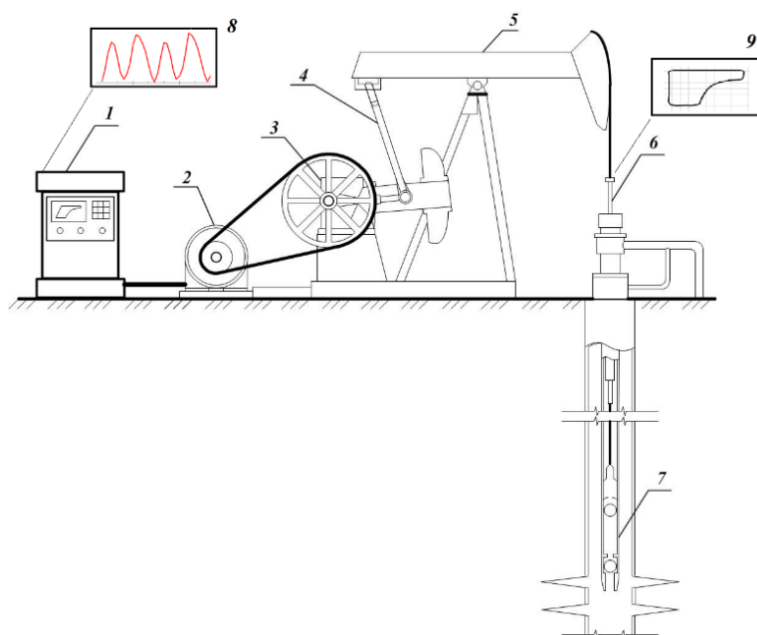


Рис. 1. Схема оборудования установок скважинных штанговых глубинных насосов:

1 – станция управления; 2 – электродвигатель; 3 – редуктор; 4 – шатун; 5 – баланси́р; 6 – полированный шток; 7 – штанговый глубинный насос; 8 – ваттметрограмма; 9 – динамограмма

В установках ШГН используются трехфазные асинхронные электродвигатели напряжением 0,4 кВ мощностью 7,5...30 кВт с синхронной частотой вращения 500...1500 об/мин (таблица I) [7]. Также существуют разработки вентильных электродвигателей для установок ШГН, которые позволяют отказаться от использования клиноременной передачи, однако, они еще не получили практического распространения [8]-[10].

Данные электродвигатели имеют в номинальном режиме КПД около 90% и коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,8$. Однако приводы ШГН работают в недогруженном режиме с циклически изменяющейся нагрузкой, поэтому на практике их характеристики значительно хуже [11].

Электродвигатели для привода станков-качалок производства концерна «Русэлпром» [7]

Наименование	Мощность, кВт	Синхронная частота вращения, об/мин	Напряжение, В
АИР180М4СНБ	30	1500	380
АИР180М6СНБ	18,5	1000	380
5А200М6СНБ	22	1000	380
5А200Л6СНБ	30	1000	380
АИР180МА8СНБ	15	750	380
АИР180М8СНБ	18,5	750	380
5А200Л8СНБ	22	750	380
АИР180МА12СНБ	7,5	500	380
АИР180МВ12СНБ	9	500	380
5А200ЛА12СНБ	11	500	380
5А200ЛВ12СНБ	13	500	380
5А200Л12СНБ	15	500	380
5А225М12СНБ	18,5	500	380
5АМ250М12СНБ	22	500	380

III. МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ЭНЕРГОПОТРЕБЛЕНИЯ УСТАНОВКИ ШГН

Определение расчетным путем удельных затрат электроэнергии на лифтинг скважинной продукции является достаточно сложной задачей. Известно несколько эмпирических подходов к определению мощности, потребляемой электродвигателем установки ШГН.

Так Плющ Б.М. и Саркисян В.О. предложили следующую формулу для нахождения активной мощности электродвигателя насосной установки [12]:

$$P_3 = \frac{N}{\eta_n} \left(K_1 + \frac{K_2 F_{\text{жс}} S}{9,8} \right), \quad (1)$$

где K_1 – коэффициент, характеризующий тип станка-качалки, Н·м;

K_2 – коэффициент, характеризующий режим откачки и диаметр насоса;

η_n – КПД передачи между двигателем и валом кривошипа, включающий потери на трение в редукторе и потери в клиноременной передаче (0,96...0,98).

Другая формула носит название Азинмаш [13]:

$$P_{\text{Э}} = 0,25 \cdot K_0 \cdot K_a \cdot \pi \cdot D_{\text{пл}}^2 \cdot L_n \cdot s \cdot \rho_{\text{сж}} \cdot g \cdot N + P_0 \quad (2)$$

где $P_{\text{Э}}$ – эффективная мощность двигателя насосной установки, Вт;

K_0 – относительный коэффициент кривой вращающего момента на валу двигателя, равный отношению фактического коэффициента формы к коэффициенту формы для синусоиды, равному 1,11;

K_a – поправочный коэффициент, учитывающий влияние деформации штанг и труб, и зависящий от отношения длины хода плунжера к длине хода устьевого штока;

$D_{\text{пл}}$ – диаметр плунжера, м;

L_n – высота подвеса насоса, м;

s – длина хода штока, м;

$\rho_{\text{сж}}$ – плотность скважинной жидкости, кг/м³;

g – ускорение свободного падения, $g = 9,8$ м/с²;

N – частота качаний, с-1;

P_0 – постоянные потери в насосной установке, не зависящие от нагрузки (потери «холостого хода»), Вт.

В работе [14] получена следующая формула для удельных затрат электроэнергии, использующая данные динамометрирования и ваттметрирования:

$$w_{\text{уд.об.}} = \frac{\frac{N}{\eta_n} \left[K_1 + \left(1,26 \cdot \sqrt{\left(\frac{S_{\text{пл}}}{S} \right)^2 + 0,28 \left(1 + 3,6 \cdot 10^{-4} \frac{SN^2}{D_{\text{пл}}^3} \right)^2} F_{\text{жс}} S \right) / 9,8 \right]}{9 \cdot 10^5 \cdot \frac{\eta_s \cdot S_{\text{пл}} \cdot N \cdot \pi \cdot D_{\text{пл}}^2}{\eta_s + (1 - \eta_s) K_{\phi}}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta\%}{100} \right) \quad (3)$$

где $S_{\text{пл}}$ и S – ход плунжера и штока, м;

N – частота качаний балансира, с-1;

$D_{\text{пл}}$ – диаметр плунжера, м;

η_n и η_s – КПД передачи от вала двигателя к валу кривошипа и КПД, соответствующий эквивалентной мощности;

$F_{\text{жс}}$ – гидростатическая нагрузка на плунжер, Н;

K_{ϕ} – коэффициент формы ваттметрограммы;

$K1$ и $K2$ – коэффициенты, характеризующие тип станка-качалки, режим откачки и диаметра насоса;

$\Delta\%$ – дополнительные удельные потери электроэнергии от несбалансированности установки ШГН, %.

Нужно отметить, что главный фактор, влияющий на потребление электроэнергии при скважинной добыче – это уровень жидкости в скважине. Чем на меньшую высоту необходимо поднять жидкость, тем меньше энергии придется затратить. Поэтому для обеспечения экономичного режима добычи необходимо поддерживать уровень жидкости в скважине наиболее близким к поверхности. На рис. 2 показано взаимодействие давлений в скважине, в результате которого устанавливается определенный уровень жидкости [15]. Снизу вверх действует давление пласта $P0$, сверху вниз – давление столба жидкости PZ . В зависимости от того, какое из этих давлений больше, происходит подъем либо понижение динамического уровня жидкости в скважине. Когда давления становятся равными, в скважине устанавливается уровень жидкости, называемый статическим. Для обеспечения минимального расхода энергии на подъем продукции необходимо поддерживать статический уровень жидкости (наиболее близкий к поверхности). Для этого нужно откачивать из скважины жидкость в количествах, не больших, чем приток из пласта. В противном случае уровень начнет понижаться и расход электроэнергии на подъем возрастет [16].

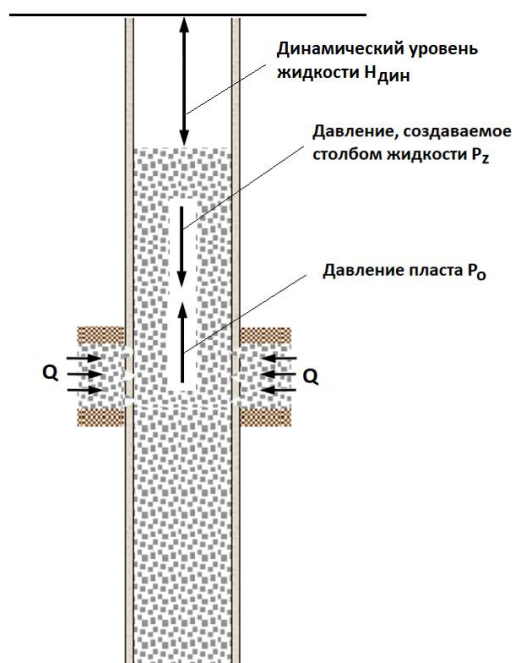


Рис. 2. Взаимодействие давлений в скважине

IV. АЛГОРИТМ УПРАВЛЕНИЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОМ УСТАНОВКИ ШГН

Как уже отмечалось выше, для обеспечения экономичного режима эксплуатации нужно откачивать из скважины жидкость в количествах, не больших, чем приток из пласта. В противном случае уровень начнет понижаться и расход электроэнергии на подъем возрастет. Ниже предлагается алгоритм управления частотно-регулируемым электроприводом установки ШГН, обеспечивающий минимальный удельный расход электроэнергии. По данным динамометрирования определяется дебит скважины [17, 18], а с помощью измеренной ваттметрограммы – расход электроэнергии за цикл качания [19, 20].

Исходными данными являются минимальная и максимальная частоты вращения для данного электропривода, начальная частота вращения, шаг изменения частоты. В процессе работы измеряются динамограмма и ваттметрограмма.

Алгоритм работы контроллера станции управления ШГН следующий:

1. Загружаются начальные параметры (минимальная и максимальная частоты питающего напряжения для данного электропривода, начальная частота питающего напряжения, шаг изменения частоты).

2. Выполняется измерение динамограмм и ваттметрограмм за 10 циклов качания.

3. Вычислить средний дебит жидкости по динамограмме Q_i за 10 циклов качания.

4. Вычислить средний расход электроэнергии по ваттметрограмме W_i за 10 циклов качания.

5. Вычислить удельный расход электроэнергии $w_i = W_i / Q_i$.

6. Если это первый цикл, то принимаем текущее значение удельного расхода электроэнергии за предыдущее удельного расхода электроэнергии $w_{i-1} = w_i$, увеличиваем частоту питающего напряжения на один шаг (0,1 Гц) и идем на п.2.

7. Если текущее значение удельного расхода электроэнергии меньше удельного расхода электроэнергии за предыдущий цикл $w_i < w_{i-1}$, то уменьшаем частоту питающего напряжения на один шаг (0,1 Гц). Принимаем текущее значение удельного расхода электроэнергии за предыдущее значение удельного расхода электроэнергии $w_{i-1} = w_i$. Перейти к п. 2.

8. Увеличиваем частоту питающего напряжения на один шаг (0,1 Гц).

9. Принимаем текущее значение удельного расхода электроэнергии за предыдущее значение удельного расхода электроэнергии $w_{i-1} = w_i$.

10. Перейти к п. 2.

При изменении частоты питающего напряжения всегда контролируется, чтобы его значение не вышло за указанные пределы – минимальную и максимальную частоты питающего напряжения.

Блок-схема приведенного алгоритма представлена на рис. 3.

V. РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ

Испытания предложенного алгоритма проводились на двух скважинах одного из действующих месторождений. Результаты испытаний приведены в таблице 2.

Таблица 2

Результаты испытаний алгоритма управления электроприводом установки ШГН
(новые значения параметров)

<i>Параметр</i>	<i>Скважина № 1</i>	<i>Скважина № 2</i>
Глубина спуска насоса, м	1192	1136
Длина хода штока, м	1,6	2,0
Динамический уровень до применения алгоритма, м	1152	481
Динамический уровень после применения алгоритма, м	1147	584
Удельное энергопотребление до применения алгоритма, кВт·ч/м ³	52,8	8,9
Удельное энергопотребление после применения алгоритма, кВт·ч/м ³	33,1	6,8
Дебит скважины до применения алгоритма, м ³ /сут	2,3	16,8
Дебит скважины после применения алгоритма, м ³ /сут	2,4	18,2

Как видно из таблицы II, предложенный алгоритм позволил существенно снизить удельные затраты электроэнергии на добычу нефти. Так, удельное энергопотребление скважины № 1 снизилось 37%, а скважины № 2 – на 24%.

При этом дебит скважин № 1 практически не изменился, а скважины № 2 даже увеличился.

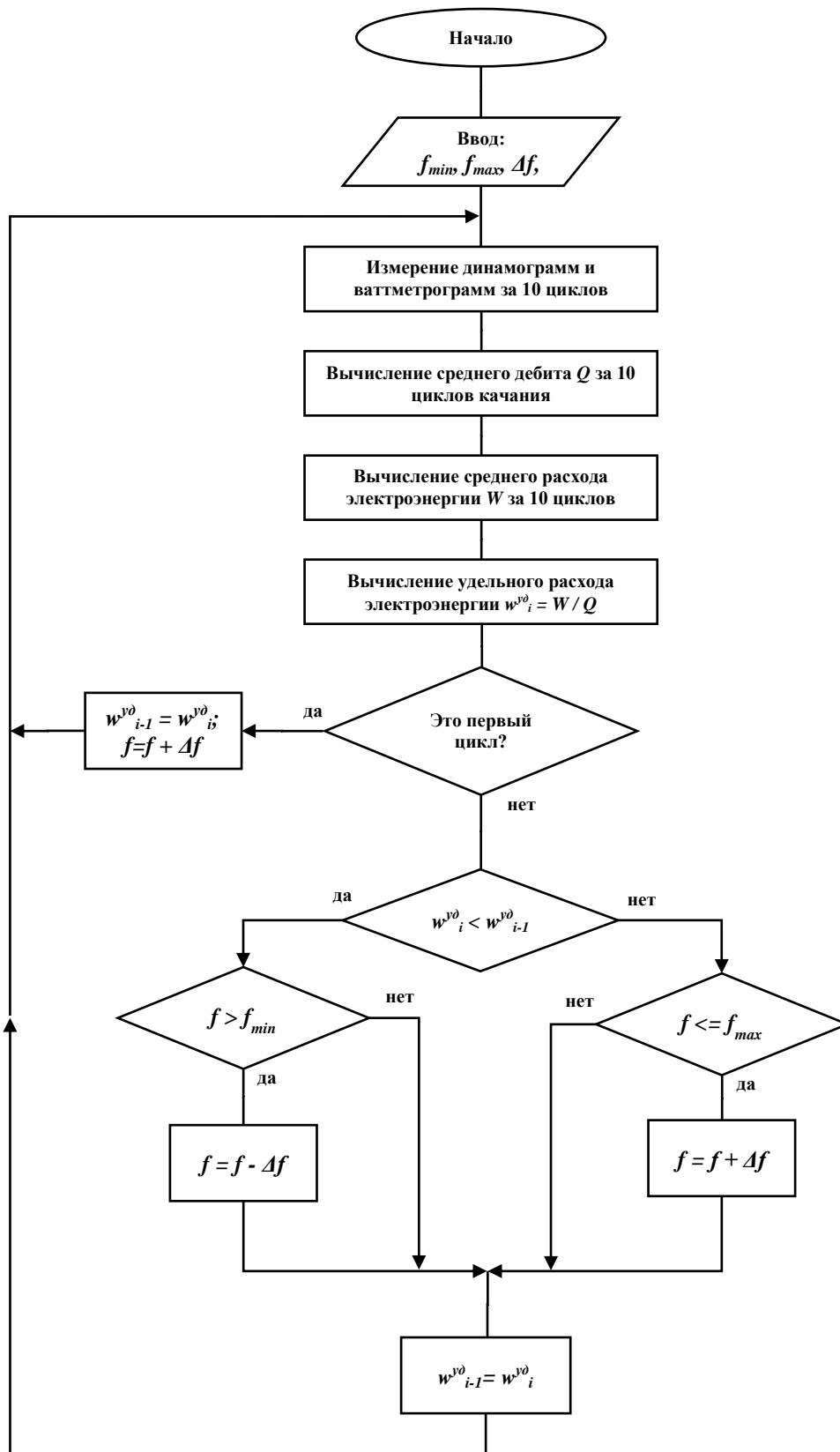


Рис. 3. Алгоритм поиска режима эксплуатации скважины с обеспечением максимального дебита и его поддержания

VI. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Таким образом, на основе изложенного могут быть сделаны следующие выводы:

1 От современных интеллектуальных станций управления требуется осуществлять эксплуатацию скважин в экономичных режимах, с обеспечением минимального либо контролируемого удельного расхода электроэнергии.

2 Для привода установок ШГН используются трехфазные асинхронные электродвигатели напряжением 0,4 кВ серий АИР, 5А, имеющие синхронную частоту вращения 500...1500 об/мин. В установках ШГН электродвигатели работают с циклически изменяющейся нагрузкой, оставаясь большую часть цикла недогруженными, что отрицательно влияет на их КПД и коэффициент мощности.

3 Для интеллектуального управления электроприводами скважинных насосов требуется получать информацию от ряда технологических датчиков, которыми должна быть оборудована насосная установка. Для установок ШГН такими датчиками являются устройства измерения динамограмм и ваттметрограмм.

4 В статье авторами предложен алгоритм управления электроприводом установки ШГН, позволяющий находить и поддерживать наиболее экономичный режим эксплуатации скважины с наименьшим удельным расходом электроэнергии.

5 Практические испытания предложенного алгоритма подтвердили его эффективность. Испытания проводились на двух скважинах, на одной из которых снижение удельных затрат электроэнергии на добычу нефти составило 37%, а на другой – 24%.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Гизатуллин Ф. А., Хакимьянов М. И. Анализ режимов работы электроприводов штанговых скважинных насосных установок //Электротехнические и информационные комплексы и системы. – 2017. – Т. 13. – №. 1. – С. 11-18.
2. Сагдатуллин А. М. Анализ энергоемкости и потребления электроэнергии по технологическим процессам в нефтегазовой отрасли //Ученые записки Альметьевского государственного нефтяного института. – 2014. – Т. 12. – №. 1. – С. 71-77.
3. Rzayev, A., Aliyev, Ya., Rezvan M., Khakimyanov, M. Electric Energy Saving Calculation Method in the Management of Sucker-Rod Pumping Units by Frequency Converters // 2020 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS). – IEEE, 2020. – Pp. 1-5.
4. Габибов И. А. О., Алиев Н. Ш. О. Рациональная эксплуатация малодебитных нефтяных скважин, эксплуатирующиеся штанговыми глубинными насосами //International Journal of Innovative Technologies in Economy. – 2018. – №. 2 (14). – С. 28-31.
5. Gibbs S.G., Neely A.B. Computer Diagnosis of Down-Hole Conditions in Sucker Rod Pumping Wells. J. of Petr. Tech. January 1966. Pp. 93-98.
6. Зюзев А. М., Бубнов М. В. Диагностика уравновешенности штанговой глубинной насосной установки по ваттметрограмме //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2019. – Т. 330. – №. 4. – С. 178-187.
7. Макаров Л. Н. Инновационные двигатели от электротехнического концерна РУСЭЛПРОМ //Деловой журнал Neftegaz. RU. – 2017. – №. 12. – С. 70-72.
8. Пачин М. Г., Лоскутников В. А. Результаты испытаний станции управления АО" ПНППК" для вентильных электродвигателей станков-качалок //Территория Нефтегаз. – 2016. – №. 6. – С. 78-83.
9. Шишлянников Д. И. Исследование силовых и энергетических параметров работы перспективных вентильных двигателей балансирных станков-качалок //Известия высших учебных заведений. Горный журнал. – 2017. – №. 5. – С. 25-30.
10. Drive for Sucker Rod Pumps SynchroGear. [Online]. Available: <https://lexsp.com/wp-content/uploads/2021/10/Drive-for-Sucker-Rod-Pumps-SynchroGear™.pdf>
11. Яшин А. Н., Хакимьянов М. И. Уравновешенность установок скважинных штанговых насосов на основе анализа ваттметрограмм //Известия Томского политехнического университета. Инжиниринг георесурсов. – 2021. – Т. 332. – №. 8. – С. 36-44.
12. Плющ Б. М., Ройтман М. В., Саркисян В. О., Эсбиян М. А. Электрооборудование нефтяных и газовых промыслов // М.: Недра, 1965.- 312 с.
13. Блантер С. Г., Суд И. И. Электрооборудование нефтяной и газовой промышленности //М.: Недра. – 1980. – 478 с.
14. Хакимьянов М. И. Повышение энергоэффективности и оптимизация режимов работы электроприводов в нефтедобывающей промышленности: дис. – Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / Уфимский государственный авиационный технический университет. Уфа, 2018.- 230 с.
15. Степанов С. В., Соколов С. В., Ручкин А. А., Степанов А. В., Князев А. В., Корытов А. В. Проблематика оценки взаимовлияния добывающих и нагнетательных скважин на основе математического моделирования // Вестник Тюменского государственного университета. Физико-математическое моделирование. Нефть, газ, энергетика. – 2018. – Т. 4. – №. 3. – С. 146-164.
16. Ивановский В. Н., Сабиров А. А., Деговцов А. В., Донской Ю. А., Булат А. В., Зуев А. С., Якимов С. Б. Вопросы энергоэффективности установок электроприводных центробежных насосов // Оборудование и технологии для нефтегазового комплекса. – 2016. – №. 4. – С. 25-30.
17. Садов В. Б. Оценка параметров нефтедобычи и управление насосной установкой с использованием динамограмм //Вестник Южно-Уральского государственного университета.

Серия: Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника. – 2013. – Т. 13. – №. 2. – С. 33-41.

18. Севастьянов А. Ю., Кучерявых И. В. Повышение точности расчета дебита по плунжерной динамограмме за счет учета работы свободного газа и интеллектуального расчета утечки жидкости // Инженерная практика. – 2013. – №. 6. – С. 150-158.

19. Артыкаева Э. М., Генин В. С., Нестерин В. А. Перспективы повышения энергоэффективности нефтедобывающих штанговых насосных установок // Электротехника. – 2011. – №. 10. – С. 2-7.

20. Сакаев А. Ф. Контроль и диагностика состояния оборудования штанговых глубинных насосов косвенным методом по ваттметрограмме с использованием искусственных нейронных сетей // Записки горного института. – 2007. – Т. 173. – С. 101-104.

Вавилов В. Е., Подгузов А. А., Юсуфов Т. А., Дадоян Р. Г., Жарков Е. О., Халиуллин Р. Я.

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА С ФУНКЦИЕЙ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ДЛЯ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ ГРУЗОВОГО АВТОМОБИЛЯ¹

Аннотация: Данная статья посвящена разработке стартер – генератора с функцией электродвигателя для гибридной силовой установки на базе двигателя внутреннего сгорания грузового автомобиля. Рассматриваются существующие схемы конструкции гибридных автомобилей. Приведены результаты моделирования электрической машины. Приведены конструктивные особенности электрической машины.

Ключевые слова: гибридный, стартер-генератор с функцией электродвигателя, двигатель внутреннего сгорания, гибридный грузовой автомобиль.

ВВЕДЕНИЕ

Исследования ученых показали, что запасов углеводорода-содержащих продуктов в мире хватит не более чем на 60 лет добычи, что требует поиска новых технических решений по замене нефтепродуктов, используемых в автомобильной отрасли, на альтернативные источники энергии. Кроме того, одной из важнейших проблем является снижение влияния токсичных компонентов в продуктах сгорания углеводородного топлива на окружающую среду.

Одним из вариантов решения этой проблемы являются гибридные силовые установки, состоящие из совокупности ДВС и электродвигателя.

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0838-2020-0006.

Источником энергии в таких автомобилях являются двигатели внутреннего сгорания, у которых крутящий момент с коленчатого вала передается на ротор генератора, вырабатывающего электрическую энергию.

Увеличение количества автомобилей с ГСУ связан с ужесточением экологических требований, а также постоянным ростом цен на горюче-смазочные материалы. Это повышает актуальность исследований гибридных автомобилей.

Целью работы является разработка стартер – генератора для гибридной силовой установки в составе двигателя грузового автомобиля. Задачами работы являются обзор конструктивных схем гибридных автомобилей, формирование концепции гибридной силовой установки грузового автомобиля, проведение электромагнитного и теплового расчета электрической машины.

ГИБРИДНЫЕ АВТОМОБИЛИ

Гибридный автомобиль — особый вид транспорта, работающий на разных источниках энергии. На современном этапе гибридный двигатель совмещает в себе электрический и классический принцип ДВС.

Гибридные силовые агрегаты могут быть разных типов. Установки отличаются не только по принципу действия, но и по схеме взаимодействия, уровню электрификации, виду и иным параметрам. Ниже рассмотрены разновидности и особенности таких систем.

Мягкий гибрид. В таких автомобилях электрическая машина предназначена для поддержки основного двигателя. Электрическая машина не используется для обеспечения движения автомобиля. Процесс рекуперации энергии происходит при нажатии на тормоз. Конструктивно в системах данного типа функцию маховика берет на себя стартер-генератор. К особенностям мягких гибридов относится малая мощность, компенсируемая только электрической частью и лишь при наборе скорости.

Полный гибрид. Электрическая машина используется только в городском режиме, а при выезде на трассу, где необходима более высокая

скорость, применяется двигатель внутреннего сгорания. При этом схема соединения ДВС с электрической частью может быть различной: разветвленной, смешанной или последовательной. Автомобиль не берет заряд от сети, а сам процесс происходит только при рекуперации. В случае разряда источника питания необходимо перейти на ДВС.

Гибриды-плагины. В таких машинах электрический узел получает энергию для заряда и вместе с ДВС обеспечивает движение колес. Гибриды – плагины способны преодолевать до 50 километров исключительно на электротяге.

В процессе развития гибридов появилось несколько схем взаимодействия электрического двигателя и ДВС. Кратко рассмотрим их особенности.

Последовательная схема взаимодействия (рис.1). Данный принцип устройства представляет собой самый простой вариант автомобильного двигателя – гибрида. Схема работы: крутящий момент от двигателя внутреннего сгорания идет к генератору. Затем генератор вырабатывает необходимое для работы электричество и передает его в аккумулятор. Дополнительно заряд аккумулятора осуществляется и путем процесса рекуперации кинетической энергии. В этой схеме движение автомобиля осуществляется лишь за счет электрической тяги.

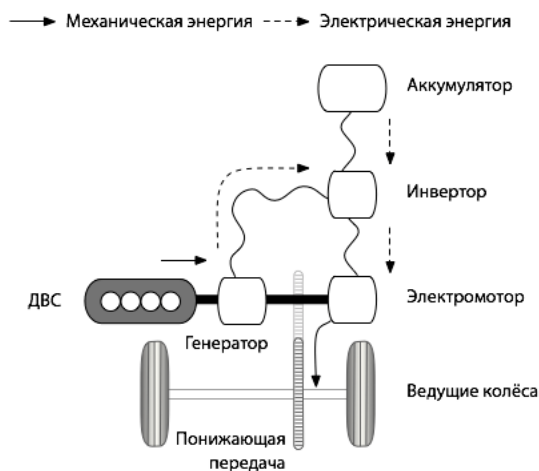


Рис. 1. Последовательная схема взаимодействия

Данная схема характеризуется последовательным преобразованием энергии, т. е. энергия, поступающая от сгораемого топлива в двигателе внутреннего сгорания, переходит в механическую, далее трансформируется в электрическую за счет генератора, и затем вновь преобразуется в механическую энергию.

Параллельная схема взаимодействия (рис.2). Принцип работы данного типа взаимодействия двух модулей происходит за счет электроники автомобиля, электродвигателя и ДВС. Оба двигателя соединены с коробкой передач по средствам планетарной передачи. На электрической энергии такие гибриды способны ехать не продолжительное время, при этом ДВС отключается от трансмиссии сцеплением.

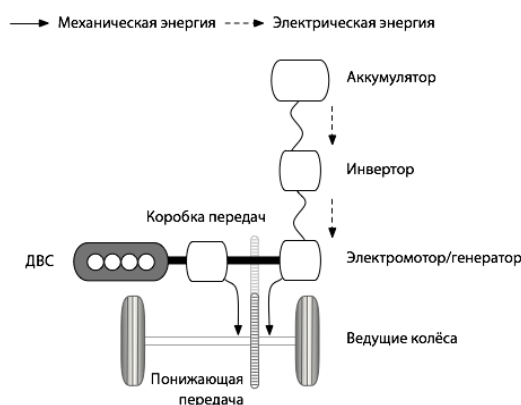


Рис. 2. Параллельная схема взаимодействия

Блок управления распределяет крутящий момент от обоих двигателей в зависимости от режима движения автомобиля. Двигателю внутреннего сгорания отведена более важная роль, а электродвигатель запускается при необходимости дополнительной тяги, например, когда авто резко ускоряется. При торможении или плавном движении электромотор работает как генератор электроэнергии.

Существуют модификации с электродвигателем отдельно от ДВС, они представляют собой сложную систему, но в то же время эффективную. Этот

модуль состоит из двух электромоторов, тягового соединенного через планетарную передачу со вторым, который служит генератором и стартером.

В такой схеме ДВС не связан напрямую с колесами, что позволяет постоянно передавать часть момента генератору и подзаряжать батарею.

Последовательно-параллельная схема взаимодействия (рис.3). Уже само название этой схемы указывает на то, что данный тип – это вариант совмещения двух ранее рассмотренных схем: последовательной и параллельной. Движение автомобиля на низкой скорости и его старт с места осуществляется только за счет силы электрической части. ДВС поддерживает работу генератора авто, как при последовательной схеме взаимодействия. Передача крутящего момента от ДВС на колеса происходит при движении на большой скорости.

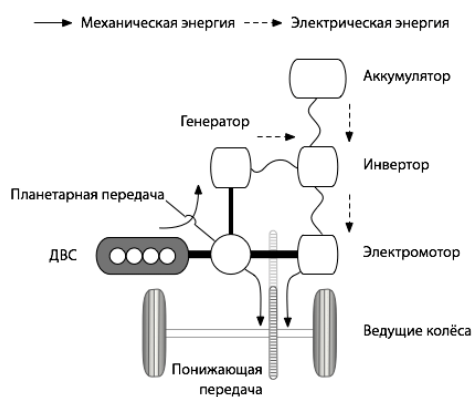


Рис. 3. Последовательно-параллельная схема взаимодействия

При высоких нагрузках, требующих повышенной мощности, генератор автомобиля может не выдать нужное количество энергии, и в таком случае электродвигатель питается дополнительно от аккумулятора, как при параллельной схеме взаимодействия.

В данной схеме предусмотрен дополнительный генератор, он подзаряжает АКБ. Электродвигатель необходим только для привода ведущих колес и для обеспечения рекуперативного торможения.

Часть крутящего момента, переходящая от двигателя внутреннего сгорания, уходит на ведущие колеса, а некоторая его часть – для работы генератора, который в свою очередь питает электродвигатель и заряжает АКБ.

За направление крутящего момента на колеса, генератор или электродвигатель и его соотношении отвечает планетарный механизм – распределитель мощности. Регулировкой подачи мощности из генератора и батареи занимается электронный блок управления автомобиля.

Также эта технология применяется и на гибридных полноприводных авто. На передней оси установлен ДВС с электродвигателем по параллельной схеме, а на задней только электродвигатель, имеющий связь с ДВС по последовательной схеме.

разработка стартер – генератора с функцией электродвигателя для гибридной силовой установки

Формирование концепции гибридной силовой установки на базе грузового автомобиля

Целью работы является разработка гибридной силовой установки, являющейся стартер – генераторной электрической машиной с двигательным режимом подкрутки основного двигателя внутреннего сгорания.

Базой разработки силовой установки выбраны дизельный двигатель седельного тягача и 12–ступенчатая автоматизированная коробка переключения передач ZF Traxon.

Для разрабатываемой ГСУ выбрана параллельно-последовательная схема взаимодействия ЭМ и ДВС. ЭМ работает в качестве стартера при запуске двигателя внутреннего сгорания и источника электроэнергии в генераторном режиме, а также обеспечивает дополнительный момент на валу ДВС в режиме электродвигателя.

Электропитание ЭМ осуществляется от аккумуляторной батареи 48 В. Переключение ЭМ из режима стартера в генераторный должно переходить при частоте ДВС 600 об/мин. Выходная мощность стартерного режима ГСУ 10 кВт.

Частота вращения до 200 об/мин. Выходная мощность в двигательном режиме 15 кВт, диапазон частоты вращения 1000–1200 об/мин.

Конструктивное расположение ЭМ в целях сохранения эргономики силовой установки автомобиля выбрано в картере маховика двигателя внутреннего сгорания (рис.4).

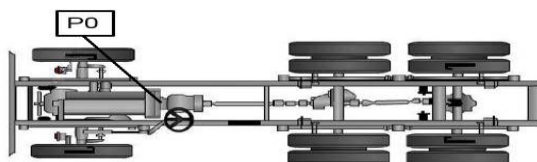


Рис. 4. Схема расположения ЭМ

Описание электрической машины

Электрическая машина представляет из себя синхронную электрическую машину с высококоэрцитивными постоянными магнитами. Такой тип ЭМ обладает наибольшими КПД и надежностью благодаря отсутствию обмотки на роторе.

Электрическая машина имеет диаметр активной части, который существенно больше длины. В таком случае использование распределенной обмотки приводит к тому, что больше половины меди является неактивной, потому что отношение лобовых частей к активной части велико. Применение зубцовой обмотки с шагом обмотки по пазам равным 1 позволяет сократить объем лобовых частей, как следствие снизить массу меди, потери в ней и осевую длину ЭМ. Среди всех типов зубцовых обмоток оптимальным вариантом в данном случае является обмотка с количеством пазов на полюс и фазу равным 0,5. Она, несмотря на низкий обмоточный коэффициент, равный 0,866, создает минимальные потери в роторе и имеет низкие индуктивные сопротивления, что крайне важно для обеспечения жесткости внешней характеристики в генераторном режиме. Одним из существенных недостатков такой схемы является высокий зубцовый момент (момент, образованный

взаимодействием полюсов ротора и пазов статора), который минимизируется скосом ротора.

В качестве материала постоянных магнитов выбран сплав самарий кобальт, так как он имеет большую температурную стабильность свойств по сравнению с неодим железо бор. Магнитная система выполнена с инкорпорированными постоянными магнитами. Благодаря наклонному расположению постоянных магнитов магнитный поток от них концентрируется на полюсном наконечнике, что позволяет получить большую магнитную индукцию в воздушном зазоре, чем в конструкции с поверхностными постоянными магнитами. К тому же такая компоновка позволяет исключить бандажную оболочку из конструкции ротора. Ротор в осевом направлении выполняется из двух сегментов, которые скрещиваются друг относительно друга на 0,75 градуса. Благодаря этому в два раза снижаются пиковые значения зубцового момента и улучшается форма кривой ЭДС.

Постоянные магниты по длине ЭМ набираются из шести отдельных сегментов, что позволяет снизить потери в них до приемлемого уровня. Для обеспечения электрической изоляции между постоянными магнитами они изолируются друг от друга клеем. Количество полюсов определяется ограничением со стороны блока электроники по частоте тока равным 1000 Гц и необходимостью получения максимально возможного количество пазов с целью минимизировать их ширину и перепад температуры по ширине катушки.

В качестве материала магнитопровода статора и ротора выбрана шихтованная сталь 2312 с толщиной листа 0,35 мм. Частота перемагничивания в номинальном режиме составляет 400–500 Гц, поэтому допустимо применение стали с толщиной 0,35 мм и меньшим содержанием кремния относительно 2421, которая применяется на больших частотах перемагничивания. Сталь 2312 имеет большие удельные потери относительно 2421, но обладает более высокими магнитными свойствами (при напряженности магнитного поля 5000 А/м магнитная индукция в стали 2421 составляет 1,55 Тл, в то время как в 2321 – 1,64 Тл), что позволяет снизить сечения магнитопровода. Сборка листов в

магнитопровод осуществляется сваркой, расчетный коэффициент заполнения сталью магнитопровода составляет 0,92.

Электрическая машина имеет жидкостное охлаждение, в качестве хладагента используется тосол с содержанием этиленгликоля 60%. Хладагент протекает по спиральному каналу в корпусе ЭМ, обеспечивая теплоотвод от активной части статора. Для такого типа охлаждения крайне важно обеспечить хороший контакт между статором и корпусом. Посадка статора в корпус должна осуществляться с натягом, переходные посадки и посадки с зазором недопустимы, так как это приведет к существенному росту теплового сопротивления между статором и корпусом и перегреву ЭМ. ЭМ работает в трех режимах: стартерный, генераторный, двигательный. Из-за большой разницы по частоте вращения в двигательном и стартерном режиме ЭДС сильно отличаются, поэтому в стартерном режиме ЭМ работает на всех 13 витках, в двигательном режиме лишь на 3 витках. Таким образом упрощается блок силовой электроники, из которого исключается повышающий преобразователь, обеспечивающий работу в двигательном режиме.

Электромагнитный расчет электрической машины

На рисунках 5 и 6 показан эскиз активной части электрической машины.

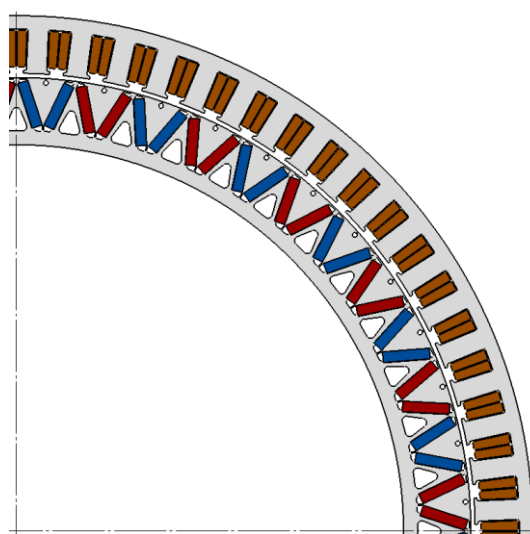


Рис. 5. Эскиз активной части в поперечном разрезе

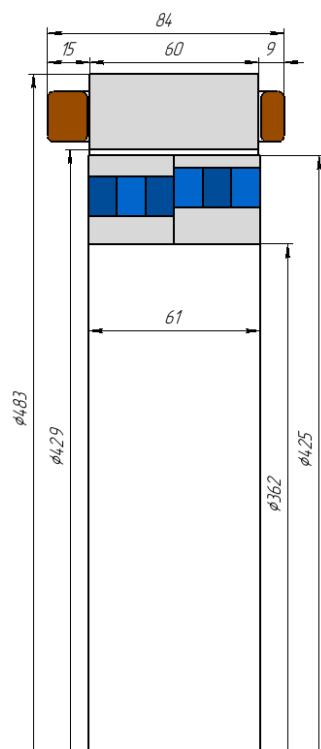


Рис. 6. Эскиз активной части в продольном разрезе

В таблице 1 показаны основные параметры ЭМ, общие для всех режимов.

Таблица 1

Параметры эм общие для всех режимов

Параметр	Значение
1	2
Количество полюсов	48
Количество пазов	72
Тип обмотки	Зубцовая двухслойная
Шаг обмотки по пазам	1
Обмоточный коэффициент	0,866
Количество витков в катушке	13
Количество параллельных ветвей	8
Количество жил в витке	17
Габариты жилы по меди/изоляции	0,5/0,544
Марка обмоточного провода, мм	ПНЭТ-имид
Коэффициент заполнения паза	0,55
Активное сопротивление при температуре 20°C, мОм	5,0
Активное сопротивление при номинальном нагреве, мОм	8,0

1	2
Индуктивность L_q на холостом ходу, мкГн	48
Индуктивность L_d на холостом ходу, мкГн	40
Потокоцепление фазы на ХХ при номинальном нагреве ПМ, мВб	22,8
Линейная ЭДС на холостом ходу при температуре постоянных магнитов 20°C, В/1000 об/мин	102,3
Линейная ЭДС при номинальном нагреве постоянных магнитов, В/1000 об/мин	99,35
Материал магнитопровода статора	2312, толщина листа 0,35 мм
Расчетный коэффициент заполнения статора сталью	0,92
Материал магнитопровода ротора	2312, толщина листа 0,35 мм
Марка постоянных магнитов	КС25ДЦ, $B_r=1,07$ Тл, $H_{сВ}=716$ кА/м
Масса магнитопровода статора, кг	9,9
Масса обмотки, кг	5,5
Масса постоянных магнитов, кг	5,4
Масса магнитопровода ротора, кг	10,0
Масса изоляции и пропитки, кг	0,65
Масса активной части, кг	31,45
Зубцовый момент, Нм	± 15
Тип охлаждения	Жидкостное по рубашке охлаждения
Хладагент	Этиленгликоль 60% + вода 40%
Длина активной части статора, мм	60
Длина активной части ротора, мм	61
Количество сегментов магнитов	6
Ориентировочная длина по лобовым, мм	84
Внешний диаметр статора, мм	483
Внутренний диаметр статора, мм	429
Внешний диаметр ротора, мм	425
Внутренний диаметр ротора, мм	362
Воздушный зазор, мм	2
Параметр	Значение
Количество полюсов	48

На рисунке 7 показана картина магнитной индукции на холостом ходу, на рисунке 8 – форма линейного ЭДС на холостом ходу.

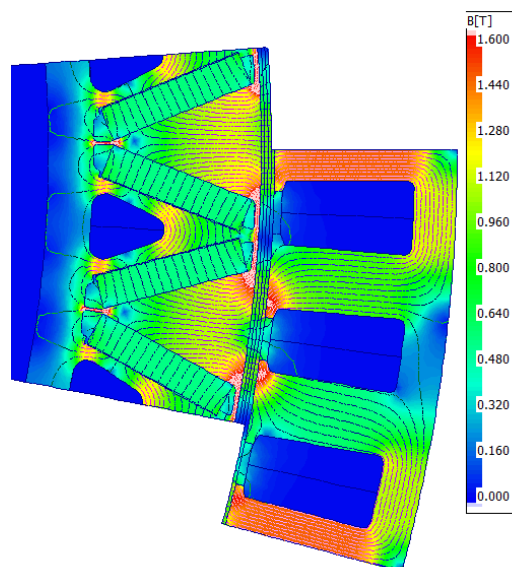


Рис. 7. Картина магнитного поля

Наибольшее значение магнитной индукции локализовано в зубце и равняется 1,45 Тл по картине магнитного поля и 1,58 Тл с учетом коэффициента заполнения 0,92. Уровень магнитной индукции в спинке статора и в роторе существенно ниже и далек от насыщения.

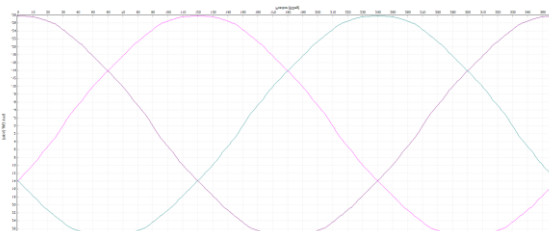


Рис. 8. Форма линейного ЭДС

Благодаря оптимизации пазовой области и скосу сегментов ротора удается получить форму ЭДС близкую к синусоидальной. Коэффициент гармонических искажений ЭДС находится на уровне 1%, что почти не сказывается негативно на работе электрической машины.

В таблице 2 представлены результаты электромагнитного расчета двигательного и стартерного режимов. Расчет проводится в *MotorCad* и *Ansys Maxwell* методом конечных элементов.

Результаты электромагнитного расчета

Параметр	Значение			
	Стартерный		Двигательный	
Режим				
Частота вращения, об/мин	142*		200	
Количество активных витков катушки	13		3	
Напряжения в цепи постоянного тока, В	48			
Действующее линейное напряжение при номинальном нагреве магнитов, В	19,4		24,9	
Действующее линейное напряжение при минимальном нагреве магнитов, В	-		25,3	
Расчета температура постоянных магнитов, °С	20		150	
Расчетная температура меди, °С	20		180	
Выходная мощность, кВт	12,0		15,0	
Потребляемая мощность, кВт	15,9	15,4	16,3	16,3
Момент, Нм	802	574**	143	119
Ток фазы, А	510	371	401	380
Угол между током и ЭДС, град	17	17	0	30 (холодные ПМ – 38)
Плотность тока, А/мм ²	19,1	13,9	15,0	14,2
Линейная токовая нагрузка, кА/м	88,5	64,4	16,0	15,2
Частота перемагничивания, Гц	56,8	80	400	480
Потери в обмотке, Вт	3900	3330	900	800
Потери в стали статора, Вт	35	50	420	513
Потери в постоянных магнитах, Вт	15	18	26	30
КПД электрической машины, %	75,5	77,9	91,3	91,8

В таблице 3 представлены результаты электромагнитного расчета генераторного режима. Расчет проводился при работе на выпрямитель. Напряжение на выходе электрической машины будет преобразовываться до нужной величины инвертором.

Результаты электромагнитного расчета

Параметр	Значение		
	600	1000	2500
Частота вращения, об/мин	600	1000	2500
Выходная мощность без учета потерь в электронике, кВт	22,3	37,6	47,4
Ток на нагрузке, А	385,8	385,8	160
Напряжение на нагрузке при номинальном нагреве магнитов, В	57,8	96,4	296
Линейное напряжение при номинальном нагреве магнитов, В	48,1	80,2	236
Максимальное напряжение на нагрузке (холостой ход), В	384		
Максимальное линейное напряжение (холостой ход), В	283		
Расчетная температура постоянных магнитов, °С	150		
Ток фазы, А	292	292	126
Плотность тока, А/ [мм] ^2	10,9	10,9	4,7
Линейная токовая нагрузка, кА/м	50,7	50,7	21,9
Частота перемагничивания, Гц	400	400	1000
Потери в обмотке, Вт	1850	1850	350
Потери в стали статора, Вт	135	280	1250
Потери в постоянных магнитах, Вт	30	75	350
Потери в стали ротора, Вт	15	40	150
Суммарные потери, Вт	2030	2245	2100
КПД электрической машины, %	91,7	94,3	95,7
Частота вращения, об/мин	600	1000	2500
Выходная мощность без учета потерь в электронике, кВт	22,3	37,6	47,4

Тепловой расчет электрической машины

Тепловой расчет ЭМ был проведен в MotorCad методом тепловых сопротивлений, а также методом конечных элементов. Результаты расчета генераторного режима приведены в таблице 4, а также на рисунках 9–11. Наиболее тяжелым режимом для статора является режим на 1000 об/мин, для ротора – на 2500 об/мин, поэтому расчеты приведены для этих частот вращения.

Результаты электромагнитного расчета

Параметр	Значение	
Температура окружающей среды, °С	130	
Хладагент	Этиленгликоль 60% + вода 40%	
Температура хладагента, °С	95	
Расход хладагента, л/мин	9	
Падение давления на ЭМ, кПа	16,5	
Скорость движения хладагента, м/с	1,4	
Частота вращения, об/мин	1000	2500
Выходная мощность без учета потерь в электронике, кВт	37,6	46,6
Потери в меди, Вт	1850	350
Потери в стали статора, Вт	280	1250
Потери в постоянных магнитах, Вт	75	350
Потери в стали ротора, Вт	40	150
Суммарные потери, Вт	2245	2100
Максимальная температура обмотки, °С	188	136
Максимальная температура постоянных магнитов, °С	134	141
Перегрев хладагента, °С	3,9	3,7

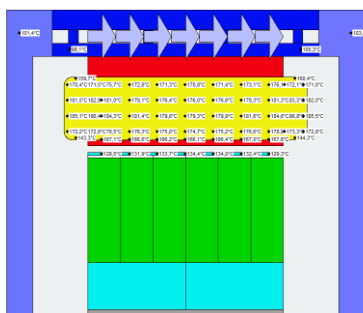


Рис. 9. Результаты теплового расчета на частоте 1000 об/мин

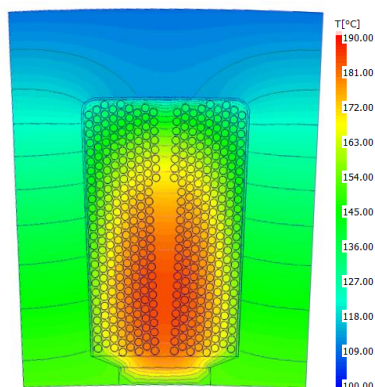


Рис. 10. Результаты теплового расчета пазовой области на частоте 1000 об/мин

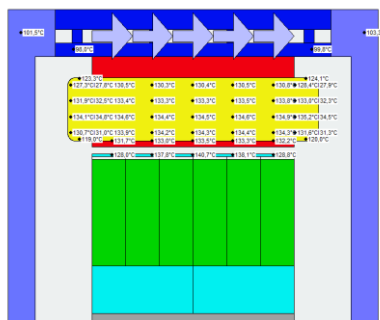


Рис. 11. Результаты теплового расчета на частоте 2500 об/мин

Как видно из представленного теплового расчета максимальная температура обмотки составила 188°C, постоянных магнитов – 141°C. Провод марки ПНЭТ-имид рассчитан на длительную работу при температуре 220°C, при такой температуре его ресурса равен 20000 часов, при температуре 188°C – 200000 часов. При расчетах между статором и корпусом закладывается воздушный промежуток, учитывающий не идеальность контакта. Для расчета по рекомендации *MotorCad* принят зазор равный 30 мкм. При идеальном контакте максимальная температура статора снижается с 188°C до 161°C. При увеличении зазора до 80 мкм растет до 219°C.

Для теплового расчета в стартерном режиме принят худший случай, когда ЭМ работает при моменте 800 Нм.

Как видно из результатов расчетов ЭМ в стартерном режиме способна работать 380 с без перерывов при моменте 800 Нм при условии пуска с температуры -50°C. Через 380 с температура обмотки составит 220°C. Стоит отметить, что для провода марки ПНЭТ-имид кратковременно допустим нагрев до температур 250-300°C, но для обеспечения высокого ресурса не рекомендуется сильно превышать температуру 220-240°C.

В двигательном режиме плотность тока довольно высокая, но из-за того, что работает лишь часть витков нагрев обмотки остается в пределах допустимых значений. По результатам теплового расчета температура обмотки в двигательном режиме не превышает 154°C.

Описание конструкции электрической машины

На рисунке 12 показана 3D модель ЭМ. В данной компоновке заменен маховик на передающий фланец для упрощения конструкции и уменьшения массы ротора, используется инкорпорированная магнитная система ротора, где вместо цельного магнитопровода используется магнитопровод из шихтованной стали для исключения из конструкции бандажа ротора и увеличения воздушного зазора. В конструкцию ротора добавлен вал для улучшения прочностных характеристик. Масса ротора данной компоновки равна 54,2 кг с возможностью дальнейшего уменьшения.

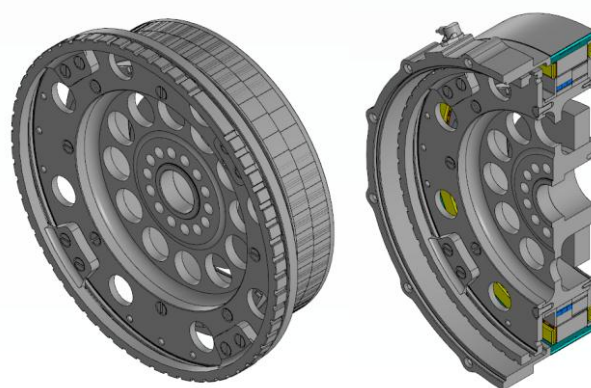


Рис. 12. Модель ротора ЭМ и ЭМ в разрезе

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Копылов И.П. Проектирование электрических машин: Учебник для вузов. – Москва: Энергия, 1980. – 496 с.
2. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов. – Москва: Высшая школа, 1990. – 416 с.
3. Редкоземельные магниты SmCo (Самарий-Кобальт). [Электронный ресурс]. URL: <http://ferrite.ru/products/magnets/smco/>
4. Справочник по электротехническим материалам: в трех томах. Т2 / Под редакцией Ю.В. Корицкого, В.В. Пасынкова, Б.М. Тареева – 3-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – С.93..
5. Биргер И.А., Шорр Б.Ф., Иосилевич Г.Б. Расчет на прочность деталей машин. Справочник. М.: Машиностроение, 1979. 702 с.
6. Анурьев В.И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т.: Т. 2. – 8-е изд., перераб. и доп. под ред. И.Н. Жестоквой. – М.: Машиностроение, 2001. – 912 с.
7. Бондаренко А. В. Менеджмент на современном предприятии: учеб пособие. М.: Сфера, 2010.

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ АППАРАТАМИ¹

Аннотация: данная статья посвящена изучению перспективы адаптации методов управления беспилотными летательными аппаратами к наземным беспилотным аппаратам. Рассмотрены достоинства и недостатки методов при их внедрении в наземные беспилотные аппараты, перспективы развития подобных технологий.

Ключевые слова: наземный беспилотный аппарат, беспилотный транспорт, беспилотные летательные аппараты..

ВВЕДЕНИЕ

Беспилотный наземный транспорт – один из видов беспилотных аппаратов, передвигающийся по земле. Так же, как и в беспилотном летательном аппарате такой вид транспорта должен иметь набор датчиков и контролирующих устройств для того, чтобы автономно принимать решения о своем поведении.

Автономность беспилотного аппарата определяется по шкале от полного контроля водителя до полного автопилота, способного передвигаться по любым маршрутам самостоятельно.

Согласно системе SAE International, существует шесть уровней автоматизации беспилотных наземных аппаратов:

- 0 – без автоматизации
- 1 – включение/совместное управление
- 2 – выключение рук
- 3 – выключение глаз
- 4 – выключение ума
- 5 – опциональное рулевое колесо

До сих пор в мире есть несколько компаний, способных выпускать автомобили третьего уровня (такие как Honda и Mercedes-Benz). Также не существует ни одного серийного автомобиля, поддерживающего четвертый

¹Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № 0838-2020-0006.

уровень автономности, хотя потенциальные образцы продолжают разрабатываться.

Автономный беспилотный аппарат работает на основе искусственного интеллекта. Полученная с датчиков информация анализируется и используется системой управления для определения плана действий, направленного на достижение определенной поставленной цели. Точность работы системы управления обычно увеличиваются, если в ней данные инерциальных измерительных устройств сочетаются с данными со спутника. Беспилотные аппараты с такими системами имеют большую дальность и повышенную надежность.

Основными требованиями к интеллектуальной системе управления беспилотного аппарата являются:

- выбор и построение оптимального маршрута для экономии времени и ресурсов аппарата;
- способность выполнять необходимые для этого вычислительные операции;
- мониторинг окружения беспилотного аппарата.
- надежность и устойчивость ко внешним вмешательствам;
- автономность в случае кратковременного или продолжительного разрыва связи с пунктом управления;
- корректировка направления движения беспилотного аппарата при образовании внешних помех;
- удержание траектории этого маршрута с учетом внешних помех;

МЕТОДЫ УПРАВЛЕНИЯ БЕСПИЛОТНЫМИ ЛЕТАТЕЛЬНЫМИ АППАРАТАМИ И ПЕРСПЕКТИВЫ ИХ АДАПТАЦИИ К НАЗЕМНЫМ БЕСПИЛОТНЫМ АППАРАТАМ

1. Теленаведение

В случае теленаведения основную роль в управлении беспилотным аппаратом играет командный пункт. Беспилотный аппарат же осуществляет самостоятельное слежение за объектом с помощью бортовых сенсоров

(например, установленной на ней телекамеры) и передает изображение на станцию, управляющую полетом. Уже на станции определяется направление полета беспилотника и высылаются соответствующие команды. Теленаведение совмещает в себе преимущества командного управления и самонаведения, увеличивая точность результата работы за счет контроля наблюдения сразу двумя факторами – пунктом управления и самим беспилотным аппаратом. Сопоставление полученных со станции и с аппарата данных позволяет уменьшить число помех. Автономность аппарата снижена.

Одним из примеров наземных беспилотных аппаратов с телеуправлением можно назвать «RipSaw Military Spec 2» (MS2), представленный на рисунке 1. «RipSaw» является беспилотной гусеничной машиной, предназначенной для сопровождения конвоя и езды по бездорожью. Несколько камер, установленных так, чтобы обеспечить обзор 360 градусов, позволяют получить полное непрерывное изображение окружающей местности, которое, в свою очередь, транслируется оператору.



Рис. 1. RipSaw. Беспилотная гусеничная машина, представленная компанией Howe and Howe Technologies

«RipSaw» – это полуавтономное транспортное средство, многие функции управления которого выполняются с помощью компьютера. Также, для повышения осведомленности операторов, машины оснащена дроном-разведчиком, способным передвигаться отдельно от машины. Разработанная командой Howe and Howe Technologies, она получила определение

«демонстратор возможностей наземной беспилотной машины» после получения своего первого контракта с армией США.

Метод телеуправления имеет наибольший потенциал для адаптации в различные другие наземные беспилотные аппараты и внедрения их в городскую среду. Основными минусами этого метода является неполная автономность (за каждым средством все еще необходим контроль со стороны оператора) и, в связи с этим, человеческий фактор.

2. Самонаведение

Автоматическое наведение беспилотного аппарата на объект с использованием энергии, испускаемой этим объектом (излучаемые или отражаемые радиоволны, тепловое излучение, акустические или световые сигналы) называется самонаведением. Параметры излучения энергии измеряются, а после используются для формирования системой управления настроек траектории полета. В зависимости от излучения, выделяемого объектом, самонаведение может быть: инфракрасным (при наличии тепловых лучей, исходящих от цели), радиолокационным (если объект отражает, либо излучает радиоволны), оптическим и акустическим (в случае, когда объект образует световые лучи или издает звук).

Основные преимущества метода самонаведения:

- Нет необходимости в прямом вмешательстве командного пункта, беспилотный аппарат полностью автономен, что позволяет переключить внимание на другие цели;

- Большая точность;

Основные недостатки метода самонаведения:

- Невозможность работы на больших расстояниях;

Самонаведение разделяют на пассивное, активное и полуактивное.

При **пассивном самонаведении** не требуется какого-либо дополнительного облучения. Объект выбирается по отличию от окружающего фона (таким отличием, к примеру, может быть тепловое излучение, исходящее

от цели, излучение, создаваемое естественными облучателями (Солнцем, Луной), или же обычный цветовой контраст цели на фоне окружения).

При самонаведении командный пункт не участвует в управлении беспилотным аппаратом. Главное отличие самонаведения от автономного управления в связи летательного аппарата и его цели, помогающее в обнаружении отклонений от конечной точки маршрута. Это качество особенно важно при наличии подвижной цели. Вторым достоинством систем самонаведения является точность.

Главный недостаток пассивного самонаведения при его адаптации в наземные беспилотные аппараты заключается в том, что при отсутствии излучения от цели ее обнаружение невозможно. Также пассивное самонаведение не определяет точное расстояние до цели, имеет сравнительно малую дальность действия, низкую помехоустойчивость и автономность, существенную зависимость точности от дальности расстояния до цели.

При **активном самонаведении** беспилотный аппарат содержит собственный излучатель, испускающий какой-либо вид энергии (к примеру, инфракрасное излучение). Само наведение осуществляется при улавливании отразившегося от цели сигнала. Таким образом, при активном самонаведении не требуется наличие какого-либо излучения со стороны цели, что является существенным преимуществом по сравнению с методом пассивного самонаведения. Помимо всего, этот метод становится более точным из-за того, что по мере приближения к цели расстояние сокращается, а отраженный сигнал усиливается и становится более точным, благодаря чему гораздо труднее сбить систему помехами.

Зачастую самонаведение используется в непосредственной близости от цели, так как из-за недостаточной силы источников питания беспилотного аппарата нет возможности сделать излучатель достаточно мощным, чтобы действовать на больших расстояниях.

Основными недостатками метода активного самонаведения в наземных беспилотных аппаратах, помимо тех, что уже присутствуют при методе

пассивного самонаведения, является увеличение габаритов беспилотного аппарата из-за размещения на нем автономного радиолокатора или любого другого вида излучателя.

Также при методе активного самонаведения точность снижается еще и за счет того, что небольшие габариты беспилотного аппарата не позволяют установить излучатель больше определенного размера (в отличие от метода полуактивного самонаведения).

При методе **полуактивного самонаведения** беспилотный летательный аппарат не имеет собственного излучателя и зависит от другого источника излучения (чаще всего находящегося на командном пункте). При использовании этого метода траектория полета выстраивается после того, как аппарат получит сигнал со станции. В этом случае командный пункт принимает отраженное от цели излучение, определяет ее угловые координаты и генерирует команду для системы управления беспилотным аппаратом.

Преимущества данного метода заключаются в том, что конструкция аппарата существенно облегчается за счет того, что все оборудование, необходимое для излучения, находится не на самом беспилотнике. За счет этого полуактивные системы, также, как и пассивные, имеют больший радиус действия.

Еще одним преимуществом полуактивного самонаведения является большая, чем в случае активного самонаведения, помехоустойчивость за счет того, что беспилотный аппарат ориентируется на сигнал, передаваемый с командного пункта, а не испущенный объектом.

В наземных беспилотных аппаратах метод самонаведения с трудом поддается адаптации к городским условиям. Из-за обилия различных подвижных препятствий образуется большое количество помех и улавливание отраженного сигнала (звуковое, световое, инфракрасное или радиоизлучение) затрудняется.

Основными недостатками метода самонаведения для беспилотных наземных аппаратов являются: недостаточная автономность аппарата

(зависимость от наземной станции), уменьшение мощности излучения пропорционально увеличению расстояния, слабая помехоустойчивость в городских условиях.

3. Автономное управление

При автономном управлении вмешательство командного пункта требуется только для запуска беспилотника. В процессе полета вся информация о траектории движения, состоянии среды, возникающих на пути помехах, а также выработка всех программ и сигналов управления для корректировки движения производится системами самого беспилотника, без какого-либо вмешательства со стороны командного пункта и других объектов. Автономная система навигации беспилотника должна обеспечивать полет по заранее определенной программой (записанной, например, на магнитной ленте) траектории, направленной к местонахождению неподвижной цели. На борту аппарата должны быть все устройства, необходимые для определения настоящего и заданного режимов полета, их сравнения и корректировки траектории в случае необходимости, для запоминания и считывания программы полета.

Зачастую автономное наведение осуществляется с помощью инерциальной системы наведения.

Сущность **инерциальной системы наведения** заключается в вычислении начальной точки самого объекта по определению его ускорения и угловых скоростей с помощью датчиков линейного ускорения (акселерометров), различных гироскопических устройств, помогающих вычислить углы наклона и поворота относительно стабильного положения и вычислительных устройств (электронных вычислительных машин), которые находят скорость, координаты и другие параметры движения.

Акселерометры дают показания в виде выходного электрического напряжения, которое преобразуется в отклонение стрелки на спидометре и указателе пройденного пути, либо передается в вычислитель в виде сигнала. Вычислительная система производит сравнение полученных сигналов с

данными скорости и пути, записанными в программе, и корректирует отклонения. Помимо этого, на протяжении всего пути система производит подсчеты вероятности промаха в случае, если будут отключены двигатели беспилотного аппарата или произведен перевод в пикирование. Вероятность промаха убывает пропорционально уменьшению расстояния до цели. Когда она принимает нулевое значение, система автоматически отключает двигатель, либо переводит ракету в пикирование.

В таком беспилотном аппарате выполняют роль стабилизатора три гироскопа со взаимно-перпендикулярными осями. Они крепятся на платформе, закрепленной так, чтобы она могла сохранять неизменным свое положение в пространстве независимо от поворотов аппарата, и помогают стабилизировать направление беспилотника по каждой из трех плоскостей. Они так же могут служить для наклона аппарата относительно первоначального положения.

Плюсы метода инерциальной навигации в том, что это позволяет автоматизировать все процессы навигации, обеспечить автономность и повысить помехоустойчивость, а работа системы проста и никак не демаскирует себя.

Инерциальные системы наведения основаны на законах механики. При известных направлении, скорости и начальных координатах можно понять, где находится аппарат и скорректировать курс.

Недостатками такого метода являются: неточность, увеличивающаяся прямо пропорционально расстоянию, небольшая скорость работы.

Несмотря на то, что автономное управление – один из наиболее подходящих методов для внедрения беспилотных наземных аппаратов в городскую среду, (при условии добавления некоторых дополнительных датчиков и систем контроля), у него все еще есть свои недостатки, заключающиеся в том, что оно не подходит для подвижных целей и никак не контролируется оператором, при этом практически все существующие беспилотные наземные транспортные средства все еще требуют вмешательства со стороны.

Основные минусы метода автономного наведения:

- использование этого метода возможно только для неподвижных целей, местонахождение которых не изменяется со временем;
- отсутствие возможности управления беспилотным аппаратом с командного пункта;

Плюсы метода автономного самонаведения:

- Возможность использовать беспилотные аппараты в местах со слабой или отсутствующей из-за помех связью (например, в районах с полями сильного электромагнитного излучения);
- Отсутствие привязки к спутниковым системам, что осложняет стороннее отслеживание;

На сегодняшний день метод автономного наведения используется в агротехнологиях. Построение траектории движения беспилотного аппарата строится на основе данных, полученных со средств технического зрения и датчиков-дальнометров. Компьютер отслеживает видеопоток, выделяя растения и препятствия на фоне почвы. Для поиска препятствий на пути на беспилотном аппарате установлен ультразвуковой сонар. Система технического зрения включает в себя блоки ввода, обработки и визуализации изображения. Здесь осуществляется считывание и задание параметров видеоизображения, выделение контуров рядов растений, нанесение маркера на рабочую полосу. Определение прямых линий осуществляется на основе математических преобразований. Так же некоторые виды наземных беспилотных аппаратов оснащены автоматизированной системой управления и контроля технологического процесса и приемниками ГЛОНАСС/GPS. Наиболее подходящим решением могло бы быть использование наземных и воздушных беспилотных аппаратов на основе единой платформы видеоцифрового управления.

Однако методы управления, подходящие для управления роботизированной агротехникой, не всегда являются подходящими для городской среды. Адаптация таких беспилотных аппаратов в городскую среду

затрудняется тем, что их система технического зрения очень ограничена и определяет траекторию на основе выделения зеленого цвета растений и построения прямых линий рядов, что в городской местности, где могут возникать препятствия любого рода, в том числе подвижные, не дает достаточной автономности аппарату. Тем не менее, при добавлении к этому набору датчиков еще и различных термографических камер, радаров, лидаров, каких-либо спутниковых и инерциальных систем, у беспилотного наземного аппарата появляется возможность передвижения в густонаселенной городской среде с наибольшей безопасностью.

Одними из наиболее известных автономных автомобилей можно назвать «Robocar», представленный на рисунке 2. Он способен разогнаться до 282,42 км/час и является самым быстрым автономным автомобилем в мире.



Рис. 2. Беспилотный болид Robocar производства компании Roborace

4. Комбинированное управление

Комбинированным управлением называется комбинация нескольких видов управления. Комбинирование может быть последовательным (в процессе движения беспилотного аппарата происходит переход с одного вида управления на другой) или параллельным (несколько видов управления действуют параллельно).

Одним из примеров беспилотных наземных аппаратов в промышленности можно считать самосвал-беспилотник КАМАЗ-6559 линейки «Юпитер» (рисунок 3).



Рис. 3. КАМАЗ-6559 линейки «Юпитер»

В отличие от всех предыдущих беспилотных моделей, в конструкции автомобиля отсутствует кабина водителя, а автономность средства обеспечивается за счет специальных камер, ультразвуковых датчиков, радаров, инерциальной системы. Имеются GSM-антенны и GPS/ГЛОНАСС навигация. Скорость движения аппарата ограничена до 56 км/ч. Многофункциональный роботизированный комплекс (МРК) был разработан для решения задач в рамках строительства, для осуществления дорожных, ремонтных и других видов работ, перевозки грузов. Управление самосвалом может осуществляться с помощью радиосигнала удаленным оператором, получающим все данные с датчиков и контрольных устройств аппарата. Также возможно самостоятельное построение беспилотным аппаратом маршрута с использованием заранее заданного алгоритма. Таким образом, автомобиль сочетает в себе способ телеуправления со способом автономного управления.

Обнаружение препятствий аппаратом производится за счет формирования области точек (рисунок 4) из данных (полученных благодаря сканирующим сонарам и дальнометрам) и видеоинформации (полученной благодаря стереозрению).

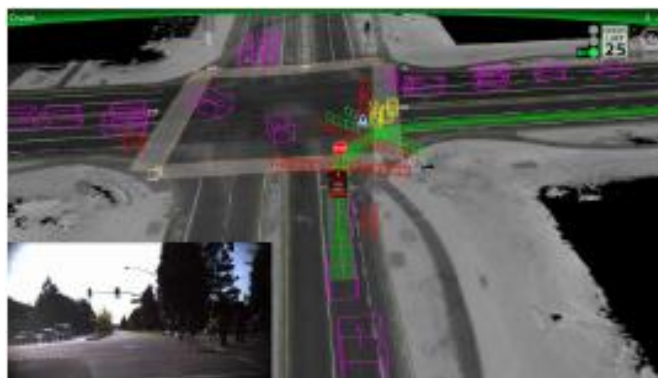


Рис. 4. Пример построения модели среды

Лидары, установленные на аппарате, составляют карту окружения за счет посылания и улавливания отраженных световых импульсов (пример действия на рисунке 5).

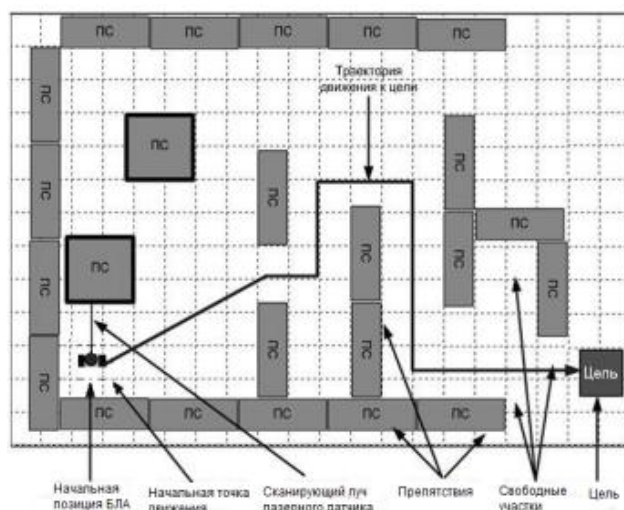


Рис. 5. Планирование полета с учетом возникающих препятствий

Радары оптимизируют движение и помогают подобрать подходящий скоростной режим, а также предоставляют актуальную информацию о скорости движения других объектов, что помогает системе принять лучшее решение. После этого распознаются ближайшие объекты и дорога, выбирается оптимальная траектория для обхода препятствия и перестраивается маршрут до цели. Все компоненты вместе с бортовым компьютером объединены в блок обнаружения и распознавания препятствий.

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ НАЗЕМНОГО БЕСПИЛОТНОГО ТРАНСПОРТА

К 2030 году согласно Федеральному проекту «Сфера» планируется выведение на орбиту группировки телекоммуникационных и навигационных спутников российского производства, в том числе спутники проекта «Марафон-ИоТ», что позволит усовершенствовать систему управления беспилотными аппаратами за счет повышения точности получаемых данных со спутника и осуществлять мониторинг поведения аппарата в режиме реального времени.

Назначение космических аппаратов системы «Марафон-ИоТ» – прием и передача данных между наземными устройствами и региональными станциями сопряжения. Также планируется адаптация открытого протокола связи «LoRaWAN» к условиям использования в космическом пространстве. «LoRaWAN» используется для приема и передачи данных от наземных датчиков на специализированный сервер. Адаптация системы к использованию в космосе расширила бы сеть и позволила бы использовать ее в общемировом масштабе, таким образом, чтобы любая страна могла создавать свои автономные региональные интернет-центры.

«Марафон-ИоТ» – это система, включающая в себя 264 спутника, размещенных на высоте около 750 км.

Основными преимуществами технологии связи «LoRaWAN» по сравнению с другими технологиями подобного рода являются:

- Возможность подключать очень большое количество внешних датчиков и контроллеров оборудования на один сервер. Ни одна другая сеть, кроме специализированной, не выдержит такой нагрузки, тем более без потери функциональности.

- Максимально сниженное энергопотребление (вплоть до того, что одна батарейки формата АА на датчике может продолжать свою работу до десяти лет).

- Высокая чувствительность приемников позволяет применять технологию на больших расстояниях – до 25-ти километров при отсутствии внешних помех. При худших условиях – минимум 2-4 километра.

- Минимальная чувствительность сигнала к помехам, вызванным погодными условиями, сторонними передатчиками или застройками.

- Используется диапазон частот, параметры мощности и ширины канала, разрешенные для использования в России.

- Безопасность сети за счет того, что каждое конечное устройство прошивается внутренним идентификатором и кодом сети подключения, при этом связь возможна только при совпадении этих данных с базовой станцией. Вся информация кодируется.

- Надежная передача сигнала.

У системы «LoRaWAN» так же есть недостатки, такие как:

- Низкая скорость передачи данных – не больше 5.5 кбит/секунду. Преимущество в виде помехоустойчивости достигается за счет снижения скорости обмена, и если для датчиков и контролирующих устройств такой скорости достаточно, то передавать аудио- и видеоданные уже не представляется возможным.

- Задержка передачи сигнала, обусловленная временем передачи радиосигнала. Она критична в случаях, когда требуется высокая скорость передачи, например, в случаях систем контроля в реальном времени.

- Ограничение мощности сигнала.

Тем не менее, такая технология идеально подходит для контроля положения транспорта за счет большого радиуса охвата, что в связке со спутниковыми системами определения координат дало бы большую точность для управления беспилотными наземными аппаратами, однако требует высокой степени автономности беспилотного аппарата и минимизирования вмешательства оператора.

Возможные методы управления наземными беспилотными аппаратами напрямую зависят от их назначения и требуемой автономности.

Также, помимо совершенствования систем спутникового управления, различные разработки ведутся в области разработки новых методов обхода беспилотным аппаратом препятствий. В статье Афанасова А.Л. («Анализ алгоритмов обхода препятствий и поиска пути в априорно неопределенной среде для мобильного устройства») описывается возможный механизм управления беспилотным аппаратом, называемый методом навигации по зазорам (GNT). Метод заключается в том, что при возникновении какой-либо помехи на пути аппарата он пытается обойти ее по границе до тех пор, пока не станет возможным продолжение движения к цели. Для аппарата, оснащенного датчиком зазора (указывающим направления, в которых происходят зазоры, без предоставления информации о расстояниях до них), выстраивается структура данных, называемая деревьями навигации зазора.

Внешний вид среды относительно аппарата кодируется как дерево, которое указывает, как зазоры изменяются по мере приближения к ним. Это предоставляет информацию для перемещения в любую часть среды по кратчайшему пути. Дерево не соответствует какой-либо статической карте среды, поэтому, предположительно, могло бы быть построено и для подвижных препятствий, если бы такая система работала достаточно быстро.

Корень дерева представляет собой датчик зазора. Для каждого зазора, проявленного в датчике, к корню подключено ребро. Выбирая ребро, аппарат совершает движение по прямой линии к этому промежутку. По мере преследования зазора становится видимой новая часть среды и действия аппарата могут быть изменены для оптимальной скорости движения.

Существует область видимости и теневая область – пространство, невидимое с точки местонахождения беспилотника, поэтому в случае, если аппарату требуется перейти к какой-то точке в теневой области, кратчайшим путем было бы непосредственное перемещение к зазору. При этом аппарат в конечном итоге достигает границы препятствия и в этот момент необходимо выбрать новое действие.

Все события, такие как появление новых зазоров, разделение одного зазора на две части, исчезновение зазора из зоны видимости аппарата или слияние двух зазоров отражаются в древе.

Достоинства метода в том, что такой механизм работы позволяет обходить препятствия по кратчайшему пути, иметь несколько различных траекторий обхода при наличии нескольких зазоров, а также построить карту многомерного пространства для неподвижного пространства, отражающее все множество возможных путей перемещения.

Минусы такого способа в том, что требуется определенное время для реагирования и выстраивания карты среды, установка дополнительных вычислительных машин и некоторая доработка алгоритма таким образом, чтобы система могла быстро реагировать на подвижные препятствия, а также определять совместимость габаритов беспилотного аппарата и размеров зазора.

заключение

Таким образом, внедрение наземных беспилотных аппаратов в городскую среду возможно только при сочетании нескольких методов наведения и управления. Однако адаптация авиационных систем управления беспилотными аппаратами на данный момент не отвечает требованиям к безопасности окружающих, а также несет угрозу и самому аппарату.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шведов, П. Е. Приборы для автономной системы навигации и ориентирования беспилотных летательных аппаратов / П. Е. Шведов, Я. А. Темник, В. К. Исламов, Р. С. Хаметов. — Текст : непосредственный // Молодой ученый. — 2018. — № 46 (232). — С. 60-65.
2. Башилов А. М., Королев В. А. Проект комплексного применения беспилотных наземных и воздушных роботов в агротехнологиях // Вестник НГИЭИ. 2021. № 6 (121). С. 37-46.
3. ВОЕННО - КОСМИЧЕСКАЯ АКАДЕМИЯ имени А.Ф.МОЖАЙСКОГО Кафедра автономных систем управления АВТОНОМНЫЕ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ И КОСМИЧЕСКИХ АППАРАТОВ Курс лекций Автор доцент ЛАПШИН Ю.В. Санкт-Петербург 2002 г.
4. Замятин, П.А., 2020. Системы управления беспилотными летательными аппаратами. Инновационная наука, 4. Date Views 29.11.2022 cyberleninka.ru/article/n/sistemy-upravleniya-bespilotnymi-letatelnyimi-apparatami.
5. Рогозин, О.В. and И.С. Пенской, 2019. Метод траекторного управления мультироторным беспилотным летательным аппаратом в задаче следования за объектом. Образовательные

технологии (г. Москва), 4. Date Views 29.11.2022 cyberleninka.ru/article/n/metod-traektornogo-upravleniya-multirotnym-bespirotnym-letatelnyim-apparatom-v-zadache-sledovaniya-za-obektom/viewer.

6. Россия планирует до 2028 года развернуть орбитальную группировку спутников Интернета вещей «Вестник ГЛОНАСС». – М. – 2020. – № 6(58).

7. Россия планирует предоставлять услуги интернета вещей по всему миру на основе системы «Марафон IoT» «Вестник ГЛОНАСС». – М. – 2021. – № 6(66).

8. Афанасов А.Л. Анализ алгоритмов обхода препятствий и поиска пути в априорно неопределенной среде мобильного устройства. // Вопросы науки и образования. 2019.

9. Русанов А.Д., Некрасов Д.К. Обзор принципов работы и алгоритмов распознавания объектов окружающей среды в беспилотных автомобилях // Новые информационные технологии в автоматизированных системах. 2016.

10. Михаил Ожерельев. Просто космос // Автопарк «5 колесо». 2022. №3-4 (137). С.7.

Шабуров П. О., Кулёва Н. Ю., Согрин А. И., Ерпалов А. В.
ФГАОУ ВО «ЮрГУ (НИУ)», Челябинск

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ТРЕХФАЗНОГО ВЕНТИЛЬНОГО ДВИГАТЕЛЯ С НЕСИНУСОИДАЛЬНОЙ ФОРМОЙ ЭДС ВРАЩЕНИЯ ПРИ 120-ГРАДУСНОЙ КОММУТАЦИИ¹

Аннотация: предложены математические выражения, описывающие электромагнитные и электромеханические процессы в трехфазном вентильном двигателе с возбуждением от постоянных магнитов с несинусоидальной формой ЭДС вращения с учетом алгоритма коммутации. Полученные уравнения описывают два этапа 120-градусной коммутации: одновременного подключения к источнику питания всех трех секций двигателя и подключения к источнику двух последовательно соединенных секций. С использованием полученных уравнений проведено моделирование конкретного двигателя ДВМ100.22 производства "КБ мехатроники" г. Златоуста. Показаны результаты моделирования токов в программе VisSim. Полученные результаты моделирования совпадают с теоретическими представлениями и подтверждают адекватность предложенной в работе системы уравнений токов. Представленные в работе результаты уточняют и развивают приведенные в других работах положения и могут использоваться для более точного моделирования и анализа работы вентильных двигателей.

Ключевые слова: трехфазный вентильный двигатель, электромеханические процессы, несинусоидальная ЭДС, 120-градусная коммутация, полупроводниковый коммутатор, математическая модель.

ВВЕДЕНИЕ

Вентильные двигатели применяются в различных технических системах и устройствах: в медицинской технике (клапаны аппаратов искусственной

¹Работа выполнялась при финансовой поддержке Минобрнауки России в рамках проекта «Создание высокотехнологичного производства экологически чистых универсальных коммунальных машин малого класса для всесезонного содержания и уборки городских территорий» по Соглашению №075-11-2022-018 от 06.04.2022 г. (Идентификатор государственного контракта 000000S407522QMY0002).

вентиляции легких, приводы кресел-каталок), промышленности (электроприводы станков, запорная арматура, насосное оборудование), транспорт (тяговый электропривод)аэрокосмической технике, где могут применяться в системах жизнеобеспечения (вентиляция, перекачка жидкостей), исполнительных электроприводах солнечных батарей (для ориентации на Солнце), гироскопических приборах космических аппаратов (привод ротора гироскопа), гироскопических системах ориентации и стабилизации.

Точное математическое описание происходящих в вентильном двигателе электромагнитных и электромеханических процессов служит основой для выбора и настройки элементов полупроводникового коммутатора, построения системы управления, расчета выходных координат рабочего органа при разных видах нагрузки.

Математическое описание вентильного двигателя рассмотрено в работах многих известных авторов: Овчинникова И.Е. [1], Бута Д.А., Балагурова В.А. [2] и Воронина С.Г. [3], но во всех рассмотренных работах не учитывается явно алгоритм коммутации ключей инвертора. Обычно этот алгоритм вводится отдельной функцией или задается матрицей коммутации. В [4] автор хоть и констатирует возможность учета алгоритма коммутации ключей в уравнениях токов фаз двигателя, но сами уравнения не приводит. Кроме того, обычно принимается упрощающее положение о синусоидальности ЭДС фаз двигателя [5]-[9], в то время как в реальных вентильных двигателях форма ЭДС – трапецеидальная [10]-[12].

В данной работе сделана попытка устранить недостатки существующей теории и записать уравнения, описывающие работу вентильного двигателя без указанных выше упрощающих допущений.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

На рис. 1 приведен график ЭДС вращения двигателя ДВМ100.22 производства "КБ мехатроники" г. Златоуста [13], из которого видно, что форма ЭДС отлична от чистой синусоиды.

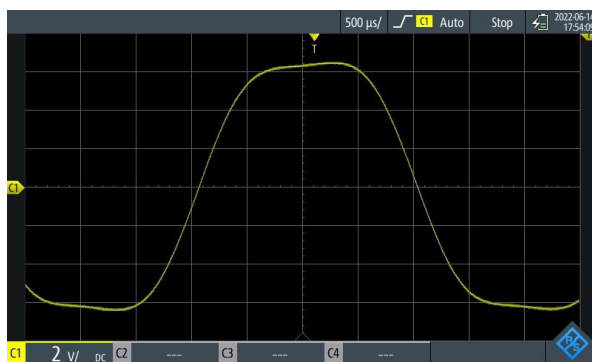


Рис. 1. ЭДС фазы вентильного двигателя

Гармонический анализ данного графика дал следующие результаты:

$$x(t) = 7,223 \sin(2\pi ft) + 0,05 \sin(2\pi 2ft) + 0,937 \sin(2\pi 3ft) \quad (1)$$

где $f = 253.165$ Гц.

В общем виде ЭДС по (1) представим выражением:

$$e(\theta_3) = e_m [\sin(\theta_3) + a_2 \sin(2\theta_3) + a_3 \sin(3\theta_3)] \quad (2)$$

где e_m – амплитуда ЭДС; θ_3 – угол поворота ротора в электрических градусах; a_2, a_3 – коэффициенты второй и третьей гармоник ЭДС, причем

$$a_2 = \frac{0.05}{7.223} = 0.006914785,$$

$$a_3 = \frac{0.937}{7.223} = 0.1297159$$

Тогда ЭДС для каждой из фаз будет описываться следующим образом [14]:

$$\begin{cases} e_a(\theta_3) = e_m (\sin(\theta_3) + a_2 \sin(2\theta_3) + a_3 \sin(3\theta_3)) \\ e_b(\theta_3) = e_m (\sin(\theta_3 - 2\pi/3) + a_2 \sin(2\theta_3 - 2\pi/3) + a_3 \sin(3\theta_3 - 2\pi/3)) \\ e_c(\theta_3) = e_m (\sin(\theta_3 + 2\pi/3) + a_2 \sin(2\theta_3 + 2\pi/3) + a_3 \sin(3\theta_3 + 2\pi/3)) \end{cases} \quad (3)$$

Схема подключения обмоток статора трехфазного вентильного двигателя к полупроводниковому коммутатору показана на рис. 2 [15].

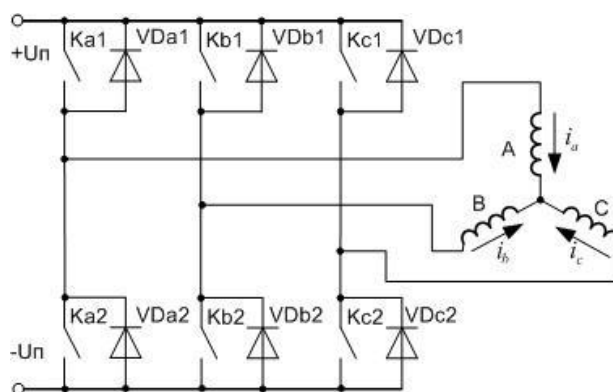


Рис. 2. Подключение трехфазного вентильного двигателя к полупроводниковому коммутатору

За положительные направления токов приняты направления токов, указанные стрелками на рис. 2.

Уравнение для токов в соответствии с первым законом Кирхгофа, запишется в виде:

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (4)$$

По рис. 2 силовой ключ Ka1 подключает фазу А к плюсу питания, Ka2 – к минусу питания. Обратные диоды VDa1 и VDa2 для фазы А необходимы для обеспечения контура протекания тока при выключении силовых ключей. Для фаз В и С все аналогично. Силовые ключи Kxx могут быть как биполярные, MOSFET или IGBT транзисторы, поэтому на рис. 2 они условно показаны в виде разомкнутых контактов.

Рассмотрим 120-градусную коммутацию, осуществляемую по сигналам от датчиков положения ротора [3], которые обычно представляют из себя датчики Холла. Примем, что первоначально были включены ключи Ka1 и Kc2. Далее Kb1 и Kc2. Для шести тактов коммутации последовательность переключения указана на рис. 3. Также условимся, что если ключ находится в замкнутом состоянии, то его состояние будем обозначать «1», если ключ разомкнут – «0». Тогда для начального состояния двигателя Ka1=1, Kc2=1, Kb1=0, Kb2=0. Не упомянутые ключи по умолчанию считаются выключенными (состояние 0).



Рис. 3. Последовательность переключения силовых ключей

В литературе [1]-[4] указано, что при смене комбинации ключей ток в отключаемой фазе не может затухнуть мгновенно и замыкается через обратный диод противоположный отключаемому ключу. Например, если включению Ka1 и Kc2, предшествовало включенное состояние Ka1 и Kb2, (то есть посредством запирания ключа Kb2 отключается фаза В), то ток в фазе А сразу после коммутации не изменяет своего направления. В отключаемой фазе В ток будет затухать и замыкаться через VDb1. Это первый этап коммутации. Ток в фазе В имеет отрицательное значение, и чтобы затухнуть – будет увеличиваться в положительном направлении пока не достигнет 0. Коммутация фазы В завершится, когда ток, протекающий через обратный диод VDb1 снизится до 0, при этом начнется второй этап коммутации. Схемы для двух этапов коммутации указаны на рис. 4.

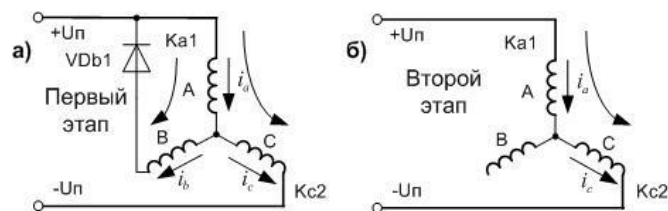


Рис. 4. Подключение обмоток двигателя на 1 этапе а) и 2 этапе б) к источнику питания

Условие работы схемы для первого этапа следующие:

$$\begin{cases} Ka1 = 1 \\ Kc2 = 1 \\ i_b < 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} U = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a - L_c \frac{di_c}{dt} - R_c i_c - e_c \\ 0 = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a - L_b \frac{di_b}{dt} - R_b i_b - e_b \\ i_a + i_b + i_c = 0 \end{cases} \quad (6)$$

Примем что $R_a = R_b = R_c = R$ и $L_a = L_b = L_c = L$. Приведем (6) к форме Коши,

выразив $\frac{di_a}{dt}, \frac{di_b}{dt}, \frac{di_c}{dt}$, в результате получим следующую систему:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{U - 3Ri_a - 2e_a + e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{U - 3Ri_b + e_a - 2e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{-2U - 3Ri_c + e_a + e_b - 2e_c}{3L} \end{cases} \quad (7)$$

Запишем по рис. 4 б) уравнения аналогичным образом для второго этапа:

$$\begin{cases} U = L_a \frac{di_a}{dt} + R_a i_a + e_a - L_c \frac{di_c}{dt} - R_c i_c - e_c \\ i_b = 0 \\ i_a + i_c = 0 \end{cases} \quad (8)$$

И в форме Коши получим:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{U - 2Ri_a - e_a + e_c}{2L} \\ \frac{di_b}{dt} = 0, i_b = 0 \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{-U - 2Ri_c + e_a - e_c}{2L} \end{cases} \quad (9)$$

Аналогично можно вывести системы уравнений и для оставшихся тактов коммутации. Сведем информацию в таблицу 2, чтобы проанализировать и обобщить полученные результаты. Состояние ключей и обратных диодов, не указанных в таблице 2, принимаются за 0.

Токи на первом и втором этапе коммутации

№	Уравнения 1 этапа	Ключи 1 этапа	Уравнения 2 этапа	Ключи 2 этапа
1	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{U - 3Ri_a - 2e_a + e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{U - 3Ri_b + e_a - 2e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{-2U - 3Ri_c + e_a + e_b - 2e_c}{3L} \end{cases}$	$\begin{cases} Ka1 = 1 \\ Kc2 = 1 \\ VDb1 = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{U - 2Ri_a - e_a + e_c}{2L} \\ \frac{di_b}{dt} = 0, i_b = 0 \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{-U - 2Ri_c + e_a - e_c}{2L} \end{cases}$	$\begin{cases} Ka1 = 1 \\ Kc2 = 1 \end{cases}$
2	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{-U - 3Ri_a - 2e_a + e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{2U - 3Ri_b + e_a - 2e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{-U - 3Ri_c + e_a + e_b - 2e_c}{3L} \end{cases}$	$\begin{cases} Kb1 = 1 \\ Kc2 = 1 \\ VDa2 = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = 0, i_a = 0 \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{U - 2Ri_b - e_b + e_c}{2L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{-U - 2Ri_c + e_b - e_c}{2L} \end{cases}$	$\begin{cases} Kb1 = 1 \\ Kc2 = 1 \end{cases}$
3	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{-2U - 3Ri_a - 2e_a + e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{U - 3Ri_b + e_a - 2e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{U - 3Ri_c + e_a + e_b - 2e_c}{3L} \end{cases}$	$\begin{cases} Kb1 = 1 \\ Ka2 = 1 \\ VDc1 = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{-U - 2Ri_a - e_a + e_b}{2L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{U - 2Ri_b + e_a - e_b}{2L} \\ \frac{di_c}{dt} = 0, i_c = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} Kb1 = 1 \\ Ka2 = 1 \end{cases}$
4	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{-U - 3Ri_a - 2e_a + e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{-U - 3Ri_b + e_a - 2e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{2U - 3Ri_c + e_a + e_b - 2e_c}{3L} \end{cases}$	$\begin{cases} Kc1 = 1 \\ Ka2 = 1 \\ VDb2 = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{-U - 2Ri_a - e_a + e_c}{2L} \\ \frac{di_b}{dt} = 0, i_b = 0 \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{U - 2Ri_c + e_a - e_c}{2L} \end{cases}$	$\begin{cases} Kc1 = 1 \\ Ka2 = 1 \end{cases}$
5	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{U - 3Ri_a - 2e_a + e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{-2U - 3Ri_b + e_a - 2e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{U - 3Ri_c + e_a + e_b - 2e_c}{3L} \end{cases}$	$\begin{cases} Kc1 = 1 \\ Kb2 = 1 \\ VDa1 = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = 0, i_a = 0 \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{-U - 2Ri_b - e_b + e_c}{2L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{U - 2Ri_c + e_b - e_c}{2L} \end{cases}$	$\begin{cases} Kc1 = 1 \\ Kb2 = 1 \end{cases}$
6	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{2U - 3Ri_a - 2e_a + e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{-U - 3Ri_b + e_a - 2e_b + e_c}{3L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{-U - 3Ri_c + e_a + e_b - 2e_c}{3L} \end{cases}$	$\begin{cases} Ka1 = 1 \\ Kb2 = 1 \\ VDc2 = 1 \end{cases}$	$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{U - 2Ri_a - e_a + e_b}{2L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{-U - 2Ri_b + e_a - e_b}{2L} \\ \frac{di_c}{dt} = 0, i_c = 0 \end{cases}$	$\begin{cases} Ka1 = 1 \\ Kb2 = 1 \end{cases}$

Анализ таблицы 2 для второго этапа показывает, что ключ с индексом 1 соответствующей фазы дает $+U$, а ключ с индексом 2 дает $-U$. ЭДС соответствующего тока всегда входит в выражение с минусом, а ЭДС другой фазы также зависит от подключаемого ключа, но всегда имеет знак плюс. Обобщим уравнения второго этапа для каждого такта коммутации в одно:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{(Ka1 - Ka2)U - 2Ri_a - e_a + (Kb1 + Kb2)e_b + (Kc1 + Kc2)e_c}{2L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{(Kb1 - Kb2)U - 2Ri_b + (Ka1 + Ka2)e_a - e_b + (Kc1 + Kc2)e_c}{2L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{(Kc1 - Kc2)U - 2Ri_c + (Ka1 + Ka2)e_a + (Kb1 + Kb2)e_b - e_c}{2L} \end{cases} \quad (10)$$

В отличие от выражений для первого этапа уравнения (10) – учитывают проводящий диод, который влияет на появление ЭДС, величину напряжения и

коэффициент 2 при индуктивностях и сопротивлениях. Коэффициент 2 просто увеличивается на 1 за счет подключаемой диодом фазы:

$$3 = 2 + K_{VD} \quad (11)$$

где $K_{VD} = VDa1 + VDa2 + VDb1 + VDb2 + Vdc1 + Vdc2$.

Аналогичным образом увеличивается и ЭДС с обратным знаком:

$$-2 = -(1 + K_{VD}), \quad (12)$$

А положительная ЭДС фазы появляется только при подключении через соответствующий диод, где k_{Ea}, k_{Eb}, k_{Ec} – коэффициент при ЭДС.

$$\begin{aligned} k_{Ea} &= Ka1 + Ka2 + VDa1 + VDa2 \\ k_{Eb} &= Kb1 + Kb2 + VDb1 + VDb2 \\ k_{Ec} &= Kc1 + Kc2 + Vdc1 + Vdc2 \end{aligned} \quad (13)$$

Для определения коэффициентов перед напряжением введем коэффициенты для каждого тока k_{Ua}, k_{Ub}, k_{Uc} .

$$\begin{aligned} k_{Ua} &= (Ka1 - Ka2 + VDa1 - VDa2 - Vdc1 + Vdc2) \\ k_{Ub} &= (Kb1 - Kb2 + VDb1 - VDb2 - VDa1 + VDa2) \\ k_{Uc} &= (Kc1 - Kc2 + Vdc1 - Vdc2 - VDb1 + VDb2) \end{aligned} \quad (14)$$

Из рассмотрения записанных уравнений (14) следует, что коэффициенты при напряжениях не учитывают состояние диодов одной из фаз. В тоже время, в уравнениях для реверса двигателя будут входить состояния другой пары диодов. В этом случае, например, в выражении для k_{Ua} вместо диодов фазы a будут учитываться диоды фазы b , остальные коэффициенты останутся без прежними, изменится только последовательность переключения фаз в соответствии с по рисунком 3.

Итоговое уравнение Коши, объединяющее первый и второй этап для каждого такта коммутации, имеет вид:

$$\begin{cases} \frac{di_a}{dt} = \frac{k_{Ua}U - (2 + K_{VD})Ri_a - (1 + K_{VD})e_a + k_{Eb}e_b + k_{Ec}e_c}{(2 + K_{VD})L} \\ \frac{di_b}{dt} = \frac{k_{Ub}U - (2 + K_{VD})Ri_b + k_{Ea}e_a - (1 + K_{VD})e_b + k_{Ec}e_c}{(2 + K_{VD})L} \\ \frac{di_c}{dt} = \frac{k_{Uc}U - (2 + K_{VD})Ri_c + k_{Ea}e_a + k_{Eb}e_b - (1 + K_{VD})e_c}{(2 + K_{VD})L} \end{cases} \quad (15)$$

Теперь чтобы найти токи из (15), необходимо проинтегрировать правые и левые части:

проинтегрировать правые и левые части:

$$\begin{cases} i_a = \int \frac{k_{Ua}U - (2 + K_{VD})Ri_a - (1 + K_{VD})e_a + k_{Eb}e_b + k_{Ec}e_c}{(2 + K_{VD})L} \\ i_b = \int \frac{k_{Ub}U - (2 + K_{VD})Ri_b + k_{Ea}e_a - (1 + K_{VD})e_b + k_{Ec}e_c}{(2 + K_{VD})L} \\ i_c = \int \frac{k_{Uc}U - (2 + K_{VD})Ri_c + k_{Ea}e_a + k_{Eb}e_b - (1 + K_{VD})e_c}{(2 + K_{VD})L} \end{cases} \quad (16)$$

Электромагнитный момент трехфазного вентильного двигателя определим суммированием моментов секций следующим образом:

$$m = \Psi_a \cdot i_a + \Psi_b \cdot i_b + \Psi_c \cdot i_c \quad (17)$$

где Ψ_a, Ψ_b, Ψ_c , – соответственно потокосцепления фаз a, b, c с потоком ротора, которые могут быть определены также как и ЭДС по (3):

$$\begin{cases} \Psi_a = \Psi_m (\sin(\theta_s) + a_2 \sin(2\theta_s) + a_3 \sin(3\theta_s)) \\ \Psi_b = \Psi_m (\sin(\theta_s - 2\pi/3) + a_2 \sin(2\theta_s - 2\pi/3) + a_3 \sin(3\theta_s - 2\pi/3)) \\ \Psi_c = \Psi_m (\sin(\theta_s + 2\pi/3) + a_2 \sin(2\theta_s + 2\pi/3) + a_3 \sin(3\theta_s + 2\pi/3)) \end{cases} \quad (18)$$

где Ψ_m – максимальное потокосцепление фазы с потоком ротора.

Механическую часть трехфазного вентильного двигателя и нагрузки опишем уравнениями механики электропривода (19):

$$\begin{cases} \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J}(m - M_c); \\ \frac{d\theta}{dt} = \omega; \\ \theta_s = p\theta \end{cases} \quad (19)$$

где M_c – момент нагрузки на валу двигателя; J – приведенный момент инерции вращающихся частей механической системы привода; θ – угол поворота ротора в геометрических градусах.

Амплитуда ЭДС вращения:

$$e_m = \Psi_m \cdot \omega \quad (20)$$

где примем $\Psi_m = K_\Phi$ – коэффициент противоэдс.

По уравнениям (3, 16-20) и по условиям таблицы 1 была создана модель двигателя в программе VisSim. Параметры привода [13] указаны в таблице 3.

Параметры двигателя ДВМ100.22

U , В	R , Ом	L , Гн	J , кг*м ²	K_{ϕ}	p	M_c , Нм	$n_{ном}$, об/мин
24	0.375	0.001	0.01	0.31	11	2.5	350

В результате моделирования номинального режима работы получили выходную скорость в 350 об/мин, такую же как в [5]. График тока в фазе А указан на рис. 6.

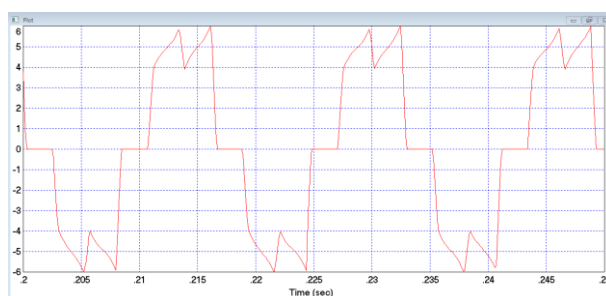


Рис. 6. Ток в фазе А

Данный график по форме совпадает с графиком для тока вентильного двигателя, приведенном в [1], [8] – что подтверждает корректность представленных уравнений токов (16) и составленной на их основе модели.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Представленное в работе математическое описание трехфазного вентильного двигателя, учитывающее дискретность коммутации фаз и несинусоидальность ЭДС вращения, но при этом сводящееся к обобщенным уравнениям, единым для всех этапов коммутации, упрощает построение моделей двигателя за счет формализации входящих в него уравнений. Верификация построенных на базе полученного математического описания моделей показала его корректность. Полученные результаты могут быть использованы для математического описания работы трехфазных вентильных двигателей, обмотки которых соединены в звезду.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. I.E. Ovchinnikov Course of lectures: Valve electric motors and drive based on them (low and medium power. St. Petersburg: KORONA-Century, 2006, p. 336.
2. V.A. Balagurov, V.M. Gridin, V.K. Lozenko Contactless DC motors with permanent magnets. M.: Energy, 1975, p. 128.
3. S.G. Voronin Electric drive of aircraft: Lecture notes. Part 1. Chelyabinsk: SUSU Publishing House, 2006, p. 171.
4. D. P. Limarenko Mathematical description of a three-phase valve motor taking into account the main possible failures in Proceedings of Tula State University. Technical sciences, 2014, №9, pp. 169-175
5. M. R. Mugalimova, R. G. Mugalimov, "Formation of traction characteristics of an asynchronous motor at the stage of its design" in Actual problems of modern science, technology and education founders: magnitogorsk state technical university named after g.i. nosov. 2013. 2. №71. pp. 45-48.
6. V.O. Goncharov, E. B.Korotkov, N. S. Slobodzyan, A.V. Chetvertukhin, "Sensor-free valve drive control system" in Young people. Space. Proceedings of the X All-Russian Youth Scientific and Technical Conference. Ser. "Library of the journal "Voenmeh. Bulletin of BSTU" 2018. No. 50 v. 2. pp. 212-217
7. G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, B. Boazzo "Performance comparison between Surface Mounted and Interior PM motor drives for Electric Vehicle application" in IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. v. 59. no. 2. pp. 803-811.
8. G. Pellegrino, A. Vagati, P. Guglielmi, B. Boazzo "Performance comparison between Surface Mounted and Interior PM motor drives for Electric Vehicle application" in IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2012. v. 59. no. 2. pp. 803-811.
9. S.G. Voronin, D.A. Kurnosov "Regulation of mechanical coordinates of a valve electric drive by vector control method" in Bulletin of SUSU. The series "Energy". 2015. Issue 15. No. 3. pp. 52-58.
10. D.S. Soldatenko, "Vector control systems for tractor traction electromechanical drive" in Current issues of machine science. 2019. 8. pp. 125-128
11. A.V. Belonogov, "Overview of drive control systems for warehouse transport robotic platforms" in Technical sciences in russia and abroad Materials of the VI International Scientific Conference. 2016 Publishing House: Publishing house "Buki-Vedi". Moscow, November 20-23. 2016. pp.11-14.
12. N. M. Dmitruk, F. M. Kirillova, "Optimization of phase-limited control systems in Reports of the national academy of sciences of belarus. Founders: National Academy of Sciences of Belarus 1999.3. №3. pp. 5-8.
13. Description and technical parameters of the DVM100.22 electric motor produced by the research and production enterprise "KB Mechatronics"[Online].
14. Available: <https://kbm36.ru/elektrodvigateli/dvm10022E..>
15. S.A. Gagarin, A.V. Krivilev "Influence of vector control methods on the energy characteristics of a mechatronic drive module with a valve motor" in Materials of the 7th scientific and technical conference "mechatronics, automation, control" (uia-2010) 2010 Publisher: JSC "Concern "Central Research Institute "Electropribor" St. Petersburg, October 12-14, 2010. pp. 116-119
16. T. Martin, R. Burke "Practical Field Weakening Current Vector Control Calculations for PMSM in Vehicle Applications," in 2013 World Electric Vehicle, Barcelona, Spain, November 17-20. 2013. pp 91-98.

Шаповалов В. А., Варюхин А. Н., Козлов А. Л., Галиев А. В., Овдиенко М. А., Егорян А. Д., Киселев И. О.

ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова» Москва

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ ЭВОЛЮЦИОННЫХ АЛГОРИТМОВ ОПТИМИЗАЦИИ ПРИ РАЗРАБОТКЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: в работе рассматривается процесс проектирования активной части синхронного электрического двигателя на постоянных магнитах с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации. Показан метод параметризации двигателя для возможности проведения оптимизационных расчетов.

Ключевые слова: электродвигатель, оптимизация, генетический алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Одно из новых и стремительно развивающихся направлений авиационной техники – использование гибридных и электрических силовых установок для летательных аппаратов. В основе таких установок находится электрический двигатель (ЭД) – устройство, преобразующее электрическую энергию в механическую. Среди всех характеристик такого устройства как наиболее важные можно выделить его удельную мощность и КПД. Первый параметр непосредственно влияет на полезную нагрузку или запас топлива (энергии) летательного аппарата, второй параметр необходимо максимизировать для уменьшения тепловыделения электрического двигателя и снижения расхода энергии. Помимо этого, существуют различные конструкторские ограничения, такие как максимальный внешний диаметр или длина изделия. В подобных условиях процесс проектирования можно свести к решению оптимизационной задачи – поиску такой геометрии активной части электромотора, при которой он имел бы минимальный вес при заданных выходной мощности, КПД и ограничениях.

С целью проведения расчетно-параметрических исследований с минимальными временными затратами в обеспечение формирования обликов ЭД, имеющих наилучшие удельные характеристики, соответствующие предъявляемым к электрической машине требованиям, применены методы оптимизации, основанные на генетических алгоритмах. В рамках выполнения

такой задачи необходимо провести параметризацию и сформировать критерии оптимизации, значения которых служат оценкой оптимальности найденного решения. Также в процессе выполнения расчетно-параметрических оптимизационных исследований ЭД накладываются ограничения на входные и выходные параметры с целью сужения области поиска оптимальных решений. Использование алгоритмов оптимизации позволяет сократить время на решение задачи проектирования ЭД с высокими удельными характеристиками.

В качестве оптимизационного алгоритма можно использовать генетический алгоритм – эвристический алгоритм поиска, используемый для решения задач оптимизации и моделирования путем случайного подбора, комбинирования и вариации искомых параметров с использованием механизмов, аналогичных естественному отбору в природе. Недостатком такого алгоритма является требование к большому числу вычислений целевой функции. Тем не менее, именно такой метод целесообразно использовать для решения задачи оптимизации электродвигателя, т.к. подобная задача может быть представлена в виде небольшого числа (порядка десяти) произвольных параметров, и небольшого (порядка четырех) числа критериев. В таких условиях, число вычислений, необходимое для сходимости метода, будет измеряться десятками тысяч, а современные персональные компьютеры способны вычислять целевую функцию менее чем за минуту (время, необходимое одному ядру процессора для решения систем уравнений Максвелла с достаточной точностью). Исходя из этого, можно предположить, что на решение задачи поиска оптимальной конфигурации электродвигателя будет уходить всего несколько сотен ядро-часов, что является очень приемлемой величиной. Таким образом обусловлен выбор эволюционного метода.

ОПТИМИЗАЦИОННО-ПАРАМЕТРИЧЕСКОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ДВИГАТЕЛЕЙ

Рассмотрим активную часть трехфазного синхронного ЭД с постоянными магнитами ротора, состоящую из статора, ротора и обмотки. Каждый компонент активной части можно однозначно определить геометрическим параметром. Таким образом, процесс проектирования можно представить, как изменение параметров для получения необходимых характеристик электродвигателя. Для каждой совокупности параметров \vec{x} можно получить совокупность характеристик \vec{y} . Для этого необходимо использовать любое специализированное программное обеспечение – расчетный модуль. Для автоматизации процесса перебора параметров нужно использовать оптимизационный модуль, реализующий эволюционные методы оптимизации на основе генетического алгоритма. Для взаимодействия оптимизационного и расчетного модулей так же необходим операционный модуль, обеспечивающий передачу данных между блоками в процессе работы. Общая структура взаимодействия модулей при проведении оптимизационных расчетов представлена на рис. 1.

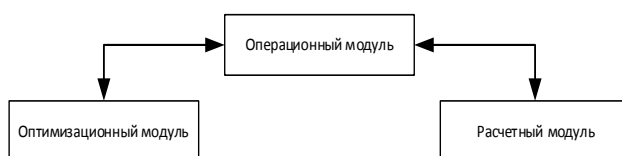


Рис. 1. Схема взаимодействия модулей оптимизационных расчетов электродвигателя

А. Параметризация моделей ЭД для проведения оптимизационных расчетов

В качестве постоянных параметров укажем материал магнитопровода статора, материал магнитопровода ротора, материал постоянных магнитов, а также материал и сечение проводника. Помимо этого, зададим число полюсов p ротора, число зубцов (пазов) статора, и максимально допустимый коэффициент заполнения паза, определяющий, насколько плотно уложена

обмотка в пазах. Тогда свободными для варьирования остаются значения фазного тока/напряжения, геометрия магнитопроводов статора и ротора и число витков обмотки. В таблице I перечислены основные варьируемые параметры.

Таблица 1

Список основных абсолютных варьируемых параметров

Название	Параметр	Диапазон
Rout	внешний радиус активной части	$(0, +\infty)$
HrM	толщина магнитов	$(0, +\infty)$
HrY	толщина ярма ротора	$(0, +\infty)$
Embrace	коэффициент заполнения магнитами	$(0, 1)$
lActive	длина активной части	$(0, +\infty)$
Turns	количество витков	$(0, +\infty)$

Для ускорения работы оптимизационного алгоритма необходимо исключить генерацию «несуществующих» решений. Под «несуществующим» решением подразумевается такой набор входных данных, при котором машина не может существовать. Такое может быть, если, например, сгенерируется такая геометрия, у которой внешний диаметр статора меньше внутреннего диаметра статора, глубина паза больше толщины статора, и т.п. Если каждый геометрический параметр машины варьировать как абсолютную величину, то окажется, что только очень малая доля от пересечения множеств входных параметров будет давать существующие решения, и, следовательно, работа оптимизационного алгоритма будет нарушена.

Чтобы не допустить такую ситуацию, введем относительные геометрические параметры, тогда все абсолютные геометрические размеры машины будут функцией некоторых абсолютных и относительных параметров. При этом абсолютные параметры выбраны таким образом, что пересечение их множеств не содержит «несуществующих» решений. В таблице II перечислены некоторые вспомогательные параметры.

Список вспомогательных варьируемых параметров

Название	Параметр	Диапазон
HBs	коэффициент толщины статора	$(0, +\infty)$
AAc	коэффициент площади паза	$(0, 1)$
HBm	отношение толщин ярма к толщине полузуба магнитопровода статора	$(0, +\infty)$
RRs	относительный радиус скругления паза	$(0, 1)$
VBs0	относительное закрытие паза	$(0, 1)$
HHs0	относительная высота шлица зуба	$(0, 1)$
HHs1	относительная высота скоса зуба	$(0, 1)$

Параметризовав геометрию с использованием вспомогательных параметров, исключается возникновение «несуществующих» решений в результате вариации вектора \vec{x} входных данных.

Использование абсолютных и вспомогательных варьируемых параметров позволяет параметризовать все компоненты активной части: статора (внешний диаметр статора, внутренний диаметр статора, длина активной части статора, высота шлица зуба, высота скоса зуба, высота ствола зуба, раскрытие паза, радиус скругления паза, толщина зуба), ротора (внешний диаметр ротора, внутренний диаметр ротора, длина активной части ротора), магнитов (толщина магнита, коэффициент заполнения магнитами) и обмотки (количество витков).

Наряду с входными параметрами для ЭД устанавливаются критерии оптимизации, по которым происходит оценка соответствия полученного решения поставленным требованиям. Одновременно с этим на входные параметры и критерии устанавливаются ограничения, обусловленные физикой процессов, а также производственными способностями.

В. Описание процесса оптимизационного расчета

При решении задачи оптимизации начальное приближение задается случайным образом: из заданного для каждого параметра диапазона варьирования выбирается случайное значение и присваивается параметру. Имеет смысл задавать обоснованные критериями задачи диапазоны варьирования, чтобы не получить заведомо неудачное начальное приближение.

Если для электрического двигателя малой мощности оставить допустимый диапазон внешних диаметров вплоть до метра, полученное начальное приближение будет не корректным, а и для оптимизации, как следствие, придется затратить большое количество времени для получения большого числа нерациональных решений.

Рассмотрим пространство решений, где каждая точка пространства представляет собой набор параметров и характеристик электродвигателя, причем каждый электрический двигатель имеет одинаковую выходную мощность. Выделим из этого подмножества плоскость $M - T$, где M – масса, T – тепловой фактор – показатель теплонапряженности двигателя. Любое подмножество на этой плоскости будет ограничено т.н. фронтом Парето – множеством Парето оптимальных значений таких, что какой-либо из двух параметров не может быть улучшен без ухудшения второго (рис. 2). Состоящий из оптимальных по M и T конфигураций Парето-фронт будет ограничивать все рассматриваемое пространство. Такой фронт назовем абсолютным. Тогда процесс оптимизации на каждом шаге будет представлять собой движение множества оптимальных по Парето решений к абсолютному фронту, а само продвижение будет реализовываться методами естественной эволюции, такими как наследование, мутация и отбор.

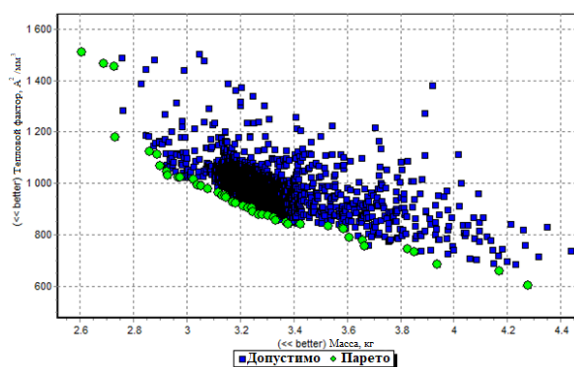


Рис. 2. Фронт Парето, на оси ординат – тепловой фактор $[A^2/мм^3]$, на оси абсцисс – масса активной части $[кг]$, 2 критерия

На каждом шаге оптимизации из всего множества решений происходит отбор – не Парето-оптимальные решения отбрасываются. Из оставшегося

множества случайным образом выбирается одна точка и для текущей итерации ей присваивается статус «родителя» – параметры этой точки будут использованы для генерации нового решения. Процесс наследования параметров «родителя» новым решением выглядит следующим образом: Пусть выбрана точка из Парето множества $(\vec{x}, \vec{y})_p$, к вектору входных параметров \vec{x}_p прибавляется вектор $\vec{d} = \vec{a} \odot \vec{w}$, являющийся покомпонентным произведением вектора амплитуд мутаций \vec{a} на вектор весов \vec{w} , где $w_k \in [-1, 1]$; $\|\vec{w}\|_2 = \sqrt{\sum (w_k)^2} = 1$; $k = 1 \dots N$, N – число варьируемых параметров. \vec{w} каждую итерацию генерируется случайным образом, а вектор амплитуд мутаций \vec{a} настраивается вручную и его следует корректировать на протяжении всей оптимизации. Дополнительно используется параметр A – глобальная амплитуда мутации, которые следует уменьшать по мере сходимости. Тогда для нового решения вектор входных данных будет равен $\vec{x}_n = \vec{x}_p + (\vec{a} \odot \vec{w}) \cdot A$, затем новому вектору \vec{x}_n решателем ставится в соответствие вектор \vec{y}_n . Так в пространстве появляется новая точка $(\vec{x}, \vec{y})_n$, унаследовавшая признаки одного из лучших решений на текущей итерации.

Таким образом реализуется двухкритериальная оптимизация, хотя для задачи проектирования ЭД двух критериев может быть недостаточно. Мощность является функцией параметров, определяющих ЭД, и пересчитывается для каждого сгенерированного решения, поэтому можно ввести критерий максимизации мощности P . Также требования к характеристикам ЭД содержат максимально допустимую степень насыщения магнитным полем магнитопровода ротора и статора, что требует введения критерия минимизации магнитной индукции B в магнитопроводе. В случае четырехкритериальной оптимизации фронт Парето теперь представляет собой не кривую на плоскости, а гиперповерхность в четырехмерном пространстве. Помимо этого, с ростом количества критериев растет доля Парето решений от

общего числа. На рис. 3 можно увидеть множество Парето-оптимальных решений при четырех критериях.

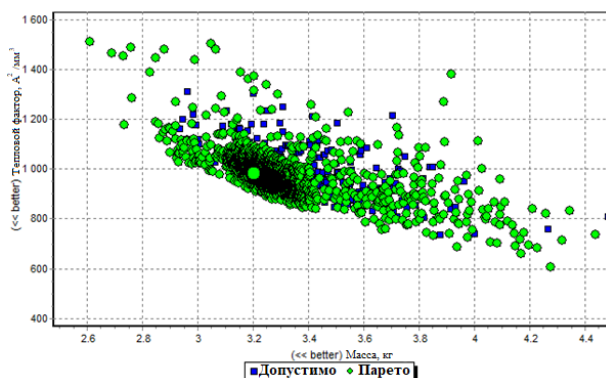


Рис. 3. Фронт Парето при введении четырех критериев, на оси ординат – тепловой фактор [$A^2/\text{мм}^3$], на оси абсцисс – масса активной части [кг], 4 критерия

Относительно большое число Парето значений требует ввести дополнительный метод отбора решений. Введем для каждого интересующего нас параметра функцию распределения вероятности. Теперь чем ближе точка к интересующему значению, тем больше у нее вероятность быть выбранной в качестве «родителя» на этапе наследования. На рисунке 4 видно, как в процессе оптимизации выходная мощность будет стремиться к заданной – у точек на вершине наибольшая вероятность того, что их характеристики будут унаследованы.

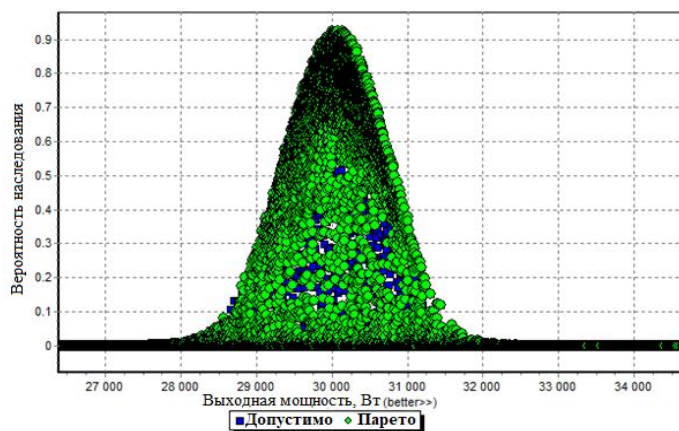


Рис. 4. Множество точек, образующих Гауссиану. На оси ординат – относительная вероятность стать «родителем», на оси абсцисс – выходная мощность [Вт]

Итерации повторяются до тех пор, пока в популяции появляются решения со все большим значением вероятности наследования, а сходимость задачи можно оценить по неизменности максимума этого значения для всей популяции.

Важно отметить, что варьирование некоторых параметров почти не оказывает влияния на целевую функцию. В контексте электромотора это точные геометрические размеры зубьев, такие как размеры и положение “хвостиков” и радиус скругления паза. Удобно задать эти параметры константами, подобранными эмпирически, тогда для вариации останется толщина и высота зуба, варьирование которых, напротив, имеет сильное влияние на целевую функцию. Такие допущения важны, т.к. уменьшение числа переменных сильно облегчает задачу поиска глобального оптимума.

Таким методом с достаточной точностью, удастся решить многокритериальную задачу с десятью варьируемыми переменными, сгенерировав в процессе не более 30000 решений. Таким образом метод оптимизации позволяет за разумное время получить оптимальную конфигурацию электродвигателя, соответствующую поставленным требованиям.

ВЫВОДЫ

В работе предложен метод параметризации электрических двигателей для проведения оптимизационно – расчетного проектирования. Описан оптимизационный алгоритм на основе генетического метода оптимизации. Показана возможность проведения многокритериального оптимизационного поиска конфигурации электрического двигателя при начальных требованиях к характеристикам и ограничениях на параметры.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Пьянков К.С., Тилляева Н.И. Многокритериальная многодисциплинарная оптимизация лопатки рабочего колеса вентилятора на основе генетического алгоритма // ТВФ, 2010, №3, с. 58-67.

Шаяхметов Д. А., Подгузов А. А.
Уфимский университет науки и технологий

ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ ПИД-РЕГУЛЯТОРА¹

Аннотация: в данной работе рассматривается ПИД регулятор. А именно настройка его параметров, рассматриваются методы оптимизации этих параметров для поиска наилучшего решения. Проводился анализ и сравнение методов оптимизации. Работа проводилась при помощи средств математического моделирования. Моделирование проводилось в программе Matlab Simulink.

Ключевые слова: пид регулятор, Matlab, Метод роя частиц, генетический алгоритм.

ВВЕДЕНИЕ

Пропорционально-интегрально-дифференцирующий (ПИД) регулятор — устройство в управляющем контуре с обратной связью. ПИД регулятор широко используется в различных системах автоматического управления для поддержания заданного качества и скорости переходного процесса. Основной задачей при использовании ПИД регуляторов заключается в поиске оптимальных коэффициентов для оптимального течения переходного процесса. В связи с этим возникает потребность в нахождении оптимальных параметров математическими методами. Для решения данной задачи существуют различные методы оптимизации, каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ РАБОТЫ

Моделирование проводилось в программном пакете *Matlab*, в которой была построена система.

Для моделирования была построена схема представленная на рис. 1. Она состоит из усилителя, возбудителя и генератора. Также есть обратная связь необходимая для функционирования регулятора.

A. Particle swarm optimization (PSO).

Он представляет собой вычислительный метод, который оптимизирует проблему, итеративно пытаясь улучшить решение-кандидат в отношении

¹Работа выполнена при поддержке Российского научного фонда, проект № 20-79-00109.

заданного показателя качества. Он решает проблему, имея популяцию возможных решений, называемых частицами, и перемещая эти частицы в пространстве поиска в соответствии с простой математической формулой относительно положения и скорости частицы. На движение каждой частицы влияет ее наиболее известная локальная позиция, но она также направляется к наиболее известным позициям в пространстве поиска, которые обновляются по мере того, как другие частицы находят лучшие позиции.

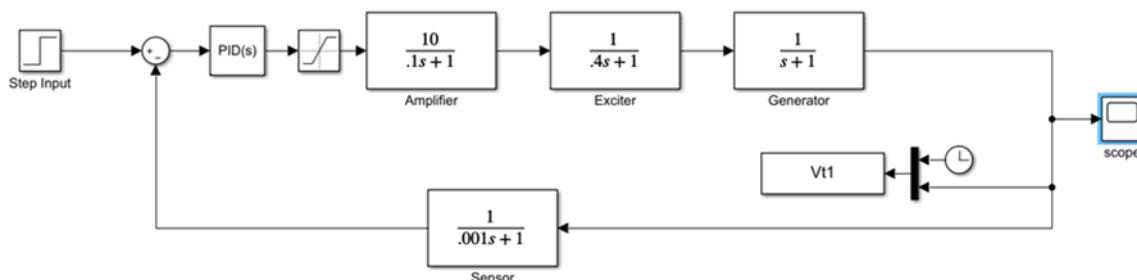


Рис. 1. Общий вид модели

Текущее состояние частицы характеризуется координатами в пространстве решений, а также вектором скорости перемещения. Оба этих параметра выбираются случайным образом на этапе инициализации. Кроме того, каждая частица сохраняет координаты лучшего из найденных ей решений, а также лучшее из пройденных всеми частицами решений – этим имитируется мгновенный обмен информацией.

На каждой итерации алгоритма направление и длина вектора скорости каждой из частиц изменяются в соответствии со сведениями о найденных оптимумах:

$$v_i = v_i + a_1 \cdot \text{rnd}() \cdot (pbest_i - x_i) + a_2 \cdot \text{rnd}() \cdot (gbest - x_i), \quad (1)$$

где v_i – вектор скорости частицы, a_1 , a_2 – постоянные ускорения, $pbest$ – лучшая найденная частицей точка, $gbest$ – лучшая точка из пройденных всеми частицами системы, x – текущее положение частицы, а функция $\text{rnd}()$ возвращает случайное число от 0 до 1 включительно [1, 2].

После вычисления направления вектора частица перемещается в точку. В случае необходимости обновляются значения лучших точек для каждой частицы и для всех частиц в целом. После этого цикл повторяется.

Для нахождения наилучшего результата необходимо вычислять ошибку каждой итерации, чтобы алгоритм смог определять какие параметры лучше или хуже.

Для этой цели добавим в структурную схему компонент вычисляющий ошибку. В качестве функции вычисления ошибки будем использовать абсолютную погрешность, умноженную на интегральное время (ИТАЕ), она вычисляется как

$$ITAE = \int_{t=0}^{t=10} |\Delta f| \cdot t \cdot dt, \quad (2)$$

где $|\Delta f|$ – модуль абсолютной ошибки [3].

Применение метода роя частиц не реализовано с помощью стандартных инструментов Matlab. Для реализации метода роя частиц необходимо, написать скрипт самого алгоритма.

Были выбраны следующие параметры алгоритма:

Диапазон изменения коэффициентов регулятора от 0 до 1000;

Количество частиц для инициализации – 25;

Максимальное число итераций – 200;

После работы алгоритма получаем следующие параметры. И соответственно график регулирования, представленный на рис. 2.

Таблица 1

Параметры регулятора и значение ошибки

Kp	Ki	Kd	ИТАЕ
3.39648	2.95759	0.89136	0.7984

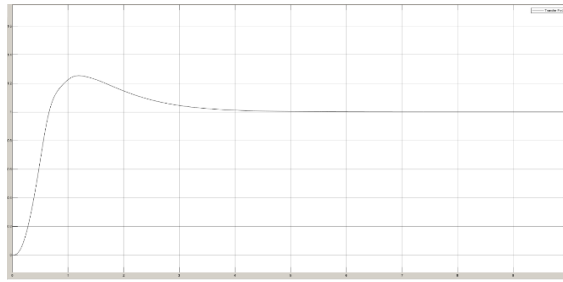


Рис. 2. График регулирования при использовании PSO

Как видно из рис.2 параметры, выбранные алгоритмом PSO не являются оптимальными. Однако для использования данного метода не требуется больших вычислительных мощностей

В. Генетический алгоритм

Генетический алгоритм – это метод решения оптимизационных задач, в основе которого лежит принцип естественного отбора и последующей эволюции. В основе генетического алгоритма лежит случайный поиск. Главным недостатком случайного поиска представляется неопределенность в количестве времени необходимое на поиск решения. Для того чтобы избежать этого используют эволюционные методы, к которому относится генетический алгоритм. Генетический алгоритм повторяет определенное количество раз процедуру модификации популяции (набора отдельных решений), добиваясь тем самым получения новых наборов решений (новых популяций). В каждом шаге модификации определяются «родительские особи», иначе говоря те решения скрещивание которых приводит к появлению нового решения в следующем поколении.

Генетический алгоритм использует три вида правил, на основе которых формируется новое поколение: правила отбора, скрещивания и мутации. Мутация позволяет путем внесения изменений в новое поколение избежать попадания в локальные минимумы оптимизируемой функции.

Размножение - это метод, который стохастически отбирает индивидов из популяции в соответствии с их пригодностью; чем выше пригодность, тем больше шансов, что индивид будет выбран для следующего поколения.

Существует три основных типа методов отбора: пропорциональный отбор по физической форме, метод ранжирования и турнирный отбор.

В этой работе используется выбор турнира. При отборе на турнир n индивидуумов выбираются случайным образом из популяции, и лучший из n вставляется в новую популяцию для дальнейшей генетической обработки. Эта процедура повторяется до тех пор, пока пул не заполнится. Турниры часто проводятся между парами отдельных лиц, хотя могут использоваться и более крупные турниры.

Процесс обучения генетического алгоритма делится на 5 этапов:

- Начальная популяция
- Функция силы особи
- Отбор наиболее сильных решений
- Обмен характеристиками между двумя особями
- Мутация
- Новая итерация с созданием начальной популяции

Начальная популяция представляет собой набор решений поставленной задачи. Каждый из членов популяции имеет свои уникальные гены, которая при объединении представляет собой хромосому. Хромосома — это решение задачи, которая уникальна для каждого из членов популяции. Гены, которые объединенные в одну строку образуют хромосому.

Функция силы задает каждому члену популяции параметр силы. Сила указывает на способность конкретного члена популяции соперничать с остальными особями по определенной характеристике. Функция присваивает каждой особи уровень силы. Чем выше сила у конкретной особи, тем больше вероятность что она будет выбрана для производства следующего поколения[4,5].

Суть отбора заключается в том, чтобы определить наиболее сильных особей, которые впоследствии передадут свои гены. Особи отбираются по парам для того чтобы осуществить скрещивание.

Скрещивание — это главный процесс генетического алгоритма. Для каждой из пар родителей случайно определяется точка в бинарной строке хромосомы, до которой особи обмениваются генами. После этого модифицированные особи называются потомством.

Точка скрещивания. Потомство создается через процесс обмена генами родителей до случайно заданной позиции в строке.

После работы алгоритма получаем следующие параметры. И соответственно график регулирования, представленный на рис. 3.

Таблица 2

Параметры регулятора и значение ошибки

K_p	K_i	K_d	ITAE
0,437954	0,441565	0,231163	0,19035

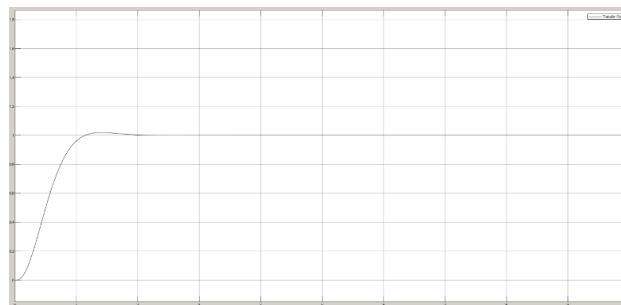


Рис. 3. График регулирования при использовании генетического алгоритма

Для анализа и сравнения всех методов необходимо привести все графики в один, чтобы наглядно рассмотреть различные методы оптимизации рис. 4.

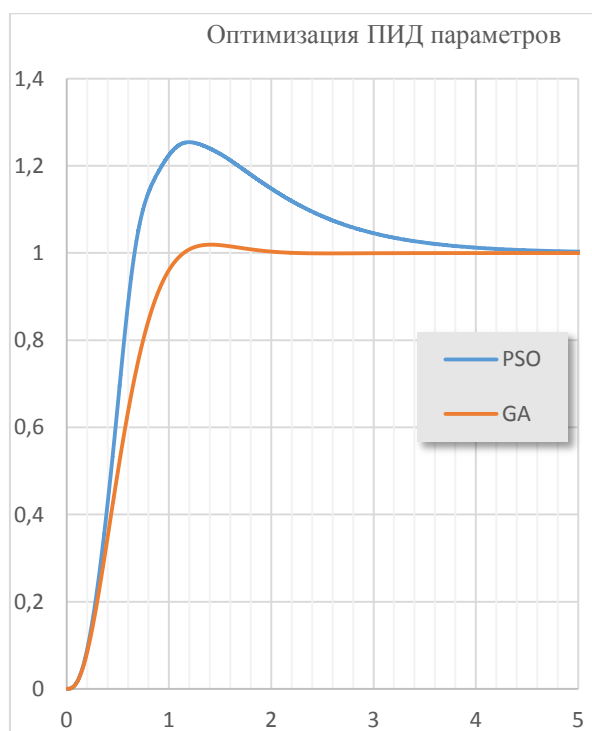


Рис. 4. Сравнение методов оптимизации

После анализа полученных данных становится видно, что метод PSO, является менее оптимальным, его значение устанавливается на нужном значении только через 5 секунд, что является слишком долгим. Однако скорость изменения при этом выше.

Метод генетического алгоритма установил оптимальные параметры ПИД регулятора. Переходный процесс занимает относительно небольшое время. При этом переходной процесс происходит без значительных перерегулирований. Однако время расчета в этом методе наибольшее, из-за чего его применение ограничено.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Introduction to Particle Swarm Optimization (PSO) and MATLAB code [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.programmingsought.com/article/99474615221/>
2. Jadhav, Ashok & Kinhal, Vadirajacharya. (2011). Performance Verification of PID Controller in an Interconnected Power System Using Particle Swarm Optimization. Energy Procedia. 14. 10.1016/j.egypro.2011.12.1210.
3. Maiti, Deepyaman & Acharya, Ayan & Chakraborty, Mithun & Konar, Amit & Janarthanan, Ramadoss. (2008). Tuning PID and FOPID Controllers using the Integral Time Absolute Error Criterion.

4. X. Meng and B. Song, "Fast Genetic Algorithms Used for PID Parameter Optimization," 2007 IEEE International Conference on Automation and Logistics, 2007, pp. 2144-2148, doi: 10.1109/ICAL.2007.4338930.
5. Ahmmed, Tanvir & Akhter, Irin & Ahamed, F. A. Sabbir & Karim, S. M.. (2020). Genetic Algorithm Based PID Parameters Optimization.
6. Devaraj, D. & Selvabala, B.. (2009). Real-coded genetic algorithm and fuzzy logic approach for real-time tuning of proportional-integral - derivative controller in automatic voltage regulator system. Generation, Transmission & Distribution, IET. 3. 641 - 649. 10.1049/iet-gtd.2008.0287.

Гуревич О. С., Гулиенко А. И., Щуровский Ю. М.
ФАУ «ЦИАМ им. П. И. Баранова»

ЭЛЕКТРОПРИВОД В СИСТЕМАХ ГАЗОТУРБИННОГО ДВИГАТЕЛЯ

Аннотация: Рассмотрено применение электроприводов в системах управления, топливопитания и смазки газотурбинного двигателя магистрального самолета. Приведены особенности их функционирования и характеристики, методы обеспечения надежности, достигаемые преимущества и перечень необходимых технологий для их реализации.

Ключевые слова: газотурбинный двигатель (ГТД), «электрический» ГТД, система автоматического управления, система топливопитания, система смазки, электрический привод (ЭП).

I. ВВЕДЕНИЕ

На современных самолетах для работы агрегатов различных систем используются три источника энергии – гидравлическая, пневматическая и электрическая. Наличие многочисленных гидравлических и пневматических коммуникаций приводит к снижению надежности систем, увеличению габаритов и массы агрегатов, усложнению и удорожанию обслуживания.

Улучшение этих показателей становится возможным при замене на самолете и в его силовой установке гидравлических и пневматических систем на электрические. Такой подход реализуется при разработке «полностью электрического» самолета (ПЭС) и «электрического» ГТД (ЭГТД) для него [1], [2]. При этом предъявляются новые требования к построению электрической системы самолета: увеличивается потребление электроэнергии, для снижения массы агрегатов и коммуникаций повышается напряжение бортовой сети до 270...540 В и выше, на ГТД размещается электрогенератор повышенной мощности с переменной частотой вращения и др.

«Электрический» ГТД - это двигатель, у которого [2]:

- стартер-генератор и дополнительный генератор;
- система управления и топливопитания с электроприводом исполнительных устройств;
- система смазки с электроприводными насосами или магнитные подшипники для подвеса роторов;
- электрическая противообледенительная система воздухозаборника двигателя;
- электрический привод реверсивного устройства;
- нет коробки приводов агрегатов и отбора воздуха на самолетные нужды.

Эти особенности ЭГТД и определяют направления работ по его электрификации, которая осуществляется поэтапно путем построения сначала «более электрического» ГТД с электрификацией отдельных систем, например, топливопитания и смазки. В системах ГТД уже применяются электрический стартер для запуска двигателя, нерегулируемые электродвигатели переменного тока для вращения насосов системы подачи топлива, электроприводные заслонки и т.п.

С появлением в 2000-е годы регулируемых вентильных электроприводов с постоянными магнитами на роторе, имеющих почти на порядок меньшую удельную массу по сравнению с электроприводами другого типа, начались работы по их применению в системах управления, топливопитания и смазки ГТД. Ниже под термином «электропривод» понимается совокупность вентильного электродвигателя и системы управления им с «электронным» коллектором подключения обмоток.

II. ЭЛЕКТРОПРИВОДНЫЕ СИСТЕМЫ ГТД

В ЦИАМе совместно с разработчиками агрегатов создана демонстрационная система автоматического управления (ДСАУ) с электроприводными исполнительными органами (рис. 1) [3].

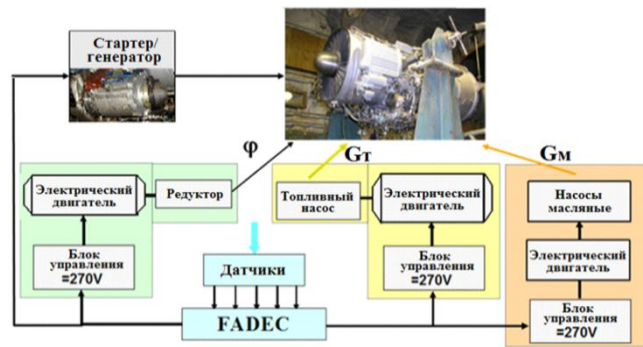


Рис. 1. Принципиальная схема ДСАУ

ДСАУ воздействует на расход топлива в камеру сгорания (G_T), положение лопаток (ϕ) направляющих аппаратов (НА), клапаны перепуска воздуха (КПВ) из компрессора и подачу масла насосами системы смазки опор роторов двигателя (G_M). Для запуска двигателя и выработки электроэнергии используется стартер-генератор. Координацию управления электроприводами осуществляет электронный цифровой регулятор (ЦР) типа FADEC.

Система подачи топлива в камеру сгорания (КС) содержит низконапорную часть с центробежным электроприводным насосом, частота вращения которого постоянна, и высоконапорную - с шестеренным насосом и электродвигателем, частота вращения которого изменяется по сигналам от цифрового регулятора.

Использование ЭП в топливной системе позволяет дозировать топливо в камеру сгорания без специального дозатора. Расход топлива в этом случае определяется частотой вращения ЭП насоса.

Электромеханизм перемещения НА разработан на базе реверсивного вентильного электропривода и шариковинтовой пары. Он производит полную перекладку НА за время 1.2 с.

При применении ЭП для перемещения лопаток НА уменьшается число прецизионных золотниковых пар в агрегатах системы управления и соединений в топливных магистралях, снижается пожароопасность, т.к. не используется керосин в силовых гидроцилиндрах, исключается влияние работы привода на топливную систему.

Электропневмопривод управления КПВ закрывает / открывает перепуск за время 0.2...0.3 с, что позволяет обеспечить устойчивую работу двигателя на установившихся и переходных режимах работы.

В электроприводной системе смазки при отдельном управлении частотой вращения ЭП нагнетающего и откачивающих насосов имеется возможность управления температурой в опорах двигателя и заполнением / опорожнением их масляных полостей, что исключает необходимость разогрева масла для запуска двигателя при отрицательных температурах, снижается время разогрева масла в круге циркуляции «бак–опоры–бак», сокращается время подготовки двигателя к вылету и др.

Для подвеса роторов двигателя рассматриваются два варианта: с обычными подшипниками качения и системой смазки, в которой применяются электроприводные насосы, и с магнитными подшипниками, для которых смазка не нужна. Второй вариант относится к отдаленной перспективе в связи с трудностями получения приемлемой массы магнитных подшипников при современных технологиях [4].

Возможность более свободной установки на ГТД электроприводных агрегатов и силовых кабелей, размещение стартера-генератора и генератора внутри двигателя, исключение коробки приводов и др., позволяют уменьшить габариты и мидель двигателя.

Проведенные расчетные и экспериментальные исследования функционирования электроприводных систем ДСАУ, а также анализ возможных схем их построения и требований, позволяет сформулировать для ЭП ряд основных базовых требований. Должно обеспечиваться функционирование электроприводов:

- без изменения характеристик при любом единичном отказе в электронной и электрической частях агрегатов;
- со снижением мощности не более 20% от максимальной при одном отказе в механической части или двух в электронной и электрической частях;

- при кратковременном повышении механической мощности на валу электродвигателя в 2...5 раз;

- с управлением частотой вращения электроприводов от электронного цифрового регулятора САУ двигателя при использовании основного и резервного алгоритмов;

- с резервированием критических параметров ЭП, в том числе и алгоритмов управления угловым положением ротора (с датчиками положения и без них);

- в условиях воздействия вибрационных нагрузок со стороны двигателя, температуры и давления окружающей среды в широком диапазоне их изменения, и других возмущающих факторов.

Отдельные требования к характеристикам электроприводов (быстродействие, частоты вращения и др.), обусловлены дополнительными условиями работы насосов в составе двигателя.

Быстродействие ЭП для насосов топливной системы определяет время перехода с режима минимального значения частоты вращения ЭП на максимальное, которое, должно быть не более 0.5...1.0 с. Это требуется для обеспечения восстановления подачи топлива при погасании КС двигателя, быстрого сброса топлива при возникновении помпажа в проточной части ГТД, для предотвращения недопустимой раскрутки роторов ГТД.

В системе смазки изменение частоты вращения электропривода от минимума до максимума характерно для переходных режимов работы двигателя, длительность которых несколько секунд. В этой связи требование к быстродействию электроприводных насосов ниже - 3...5 с, что позволит изменять подачу масла в двигатель приблизительно в темпе изменения частоты вращения роторов ГТД.

Максимальная частота вращения ЭП определяется обычно частотой вращения насоса. Учитывая факт снижения массы электропривода с ее увеличением, в топливной системе прогнозируется использование ЭП с частотой вращения 10000...25000 об/мин, а в системе смазки: нагнетающего

шнекошестеренного насоса - 6000...10000 об/мин, откачивающего шнекошестеренного - 10000...15000 об/мин или шнекоцентробежного насоса - 20000...25000 об/мин.

Для обеспечения эффективной работы суфлера частота вращения ротора его электропривода должна быть не ниже 25000 об/мин.

Диапазон регулирования частоты вращения ЭП (кратность изменения частоты вращения) для насосов систем топливопитания и смазки должен обеспечивать подачу рабочей среды (топливо, масло) в двигатель от минимального значения, обеспечивающего нормальную работу форсунок, до максимального. В топливной системе этот диапазон может составлять до 1 : 20, для ЭП нагнетающего насоса системы смазки, как правило, - 1 : 4, а для суфлера – 1 : 3.

Погрешность поддержания частоты вращения ЭП для насосов топливной системы должна составлять $\pm 0.2...0.5\%$, чтобы обеспечить требование к точности подачи топлива в двигатель ($\pm 2\%$), а для насосов системы смазки достаточна погрешность $\pm 0.5...1.0\%$.

Мощность ЭП для насосов систем ГТД необходимо выбирать с учетом типового полетного цикла (ТПЦ) двигателя [5]. Максимальная (пиковая) мощность насосов топливной системы требуется на режиме взлета, а системы смазки – на запуске при отрицательных температурах окружающей среды, взлете и на переходных режимах в условиях кратковременного повышения газосодержания в масле [6]. Продолжительность этих режимов составляет не более 5 минут. Остальное время ЭП насосов работают на режимах с пониженной мощностью.

Номинальная (расчетная) мощность ЭП, определенная из требований ТПЦ, меньше, чем пиковая, и, следовательно, масса электропривода также будет меньше [5]. Как правило, эта величина выше потребной мощности ЭП на крейсерском режиме полета.

Коэффициент перегрузки по мощности, т.е. отношение максимальной (пиковой) мощности к номинальной, характеризует перегрузочную способность

ЭП. Современные вентильные ЭП способны обеспечивать коэффициент перегрузки 5...7 и выше. С увеличением коэффициента перегрузки растут тепловые потери в узлах электропривода, что требует применения системы их охлаждения.

В топливной системе ГТД охлаждение ЭП организуется путем прокачки топлива через его теплонапряженные узлы. При этом прокачиваемое в двигатель топливо сначала поступает в тракт охлаждения силовых обмоток ЭП и других узлов, после чего подается на вход насоса и далее с его выхода в камеру сгорания.

Использование изложенного подхода к определению проектной мощности электропривода с учетом распределения его потребной мощности в ТПЦ при использовании 5...7 - кратной перегрузочной способности ЭП и применении топлива для охлаждения позволяет в 1.5...2 раза снизить массу электропривода топливного насоса [5].

III. АЛГОРИТМИЧЕСКОЕ РЕЗЕРВИРОВАНИЕ ЭП

Реализация перечисленных требований к ЭП систем топливопитания и смазки может быть достигнута повышением надежности электроприводов, а также структурным построением систем с резервированием отдельных узлов.

Надежность ЭП обеспечивается, в частности, применением [7]:

- многофазной (5...6 фаз) структуры ЭП,
- двухканального блока управления,
- дублированием силовых ключей и датчика углового положения ротора или использованием управления без него,
- вибродиагностикой подшипниковых опор,
- резервированием алгоритмов управления.

Для вращения насосов систем ГТД обычно используются регулируемые вентильные ЭП с постоянными магнитами на роторе [3]. Они содержат электродвигатель и блок управления, который работает в режиме регулирования частоты вращения электродвигателя пэд или величины тока в

его силовых обмотках $I_{эд}$, т.е. крутящего момента на валу электродвигателя. Величина крутящего момента пропорциональна перепаду давлений на насосе. На рис. 2 показана схема системы управления частотой вращения электропривода топливного насоса.

При работе в режиме поддержания частоты вращения вала электродвигателя на вход регулятора частоты вращения поступают сигналы о фактической частоте вращения пэд от встроенного в электродвигатель датчика частоты вращения и требуемой частоте вращения пэд.зад от системы управления ГТД.

При работе в режиме поддержания крутящего момента на валу электродвигателя функционирует регулятор тока. На его вход поступают сигналы о фактической величине тока от датчика тока и заданного значения тока от регулятора. Максимальное значение тока ограничивается.

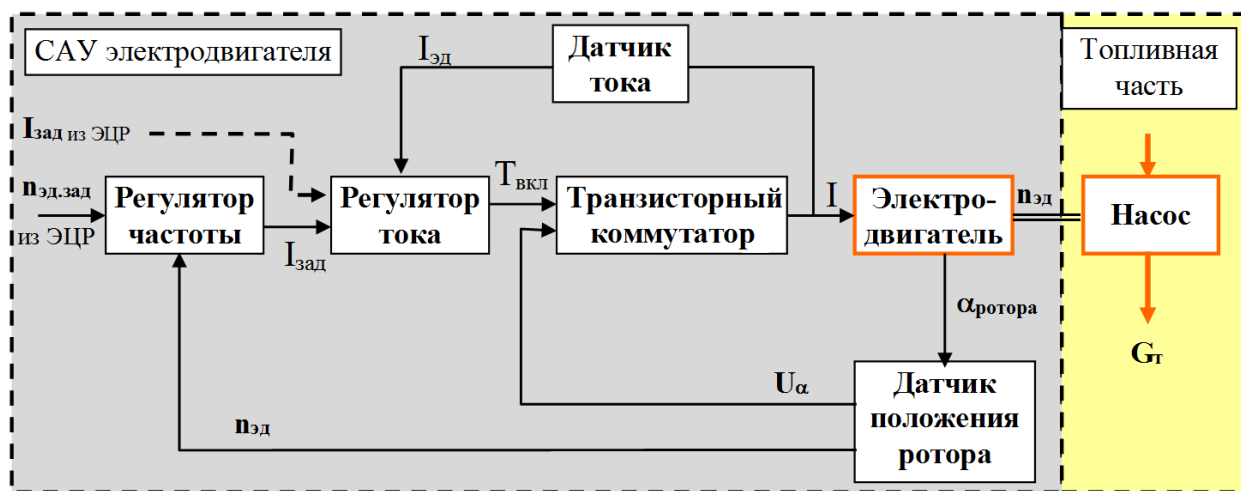


Рис. 2. Структурная схема САУ вентильного ЭП

На вход коммутатора, работающего в релейном режиме с частотой переключения > 10 кГц, поступают сигналы U_{α} от датчиков положения ротора и $T_{вкл}$ от регулятора тока. Коммутатор работает в режиме широтно-импульсной модуляции, сигналы управления с него обеспечивают необходимую последовательность и время включения обмоток.

Для формирования программ управления параметрами ЭП в составе ГТД определяются характеристики электроприводных систем в стендовых условиях в виде зависимостей расхода рабочей среды на выходе из насоса и перепада давлений на нем от частоты вращения электродвигателя. На рис.3 показаны такие характеристики для электроприводного топливного насоса, снятые на автономном топливном стенде. На рис. 3 G_T – расход топлива, ΔP_H – перепад давлений.

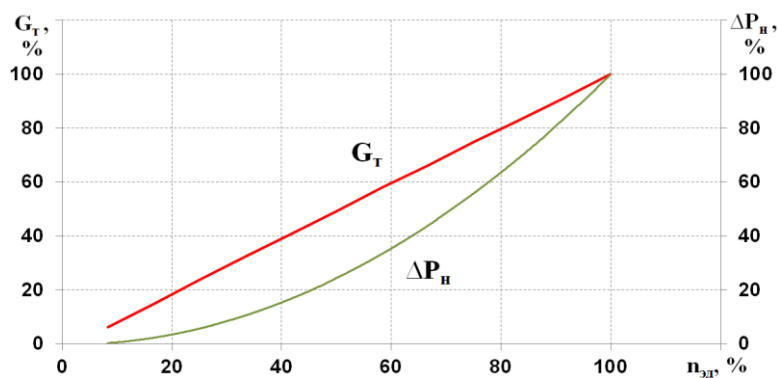


Рис. 3. Статические характеристики электроприводного насоса

На основании характеристик электроприводных насосов, приведенных на рис. 3, определяются программы управления частотой вращения электропривода $n_{эд.зад}$ или тока в его силовых обмотках $I_{эд.зад}$ в зависимости от требуемого для двигателя расхода рабочей среды. Для топливного насоса такие характеристики приведены на рис. 4.

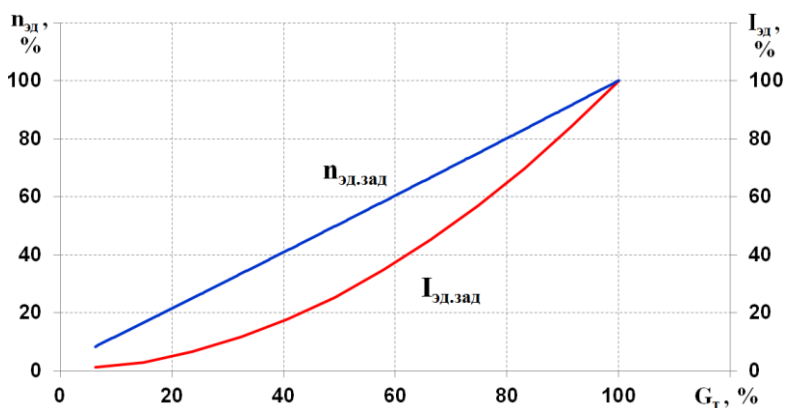


Рис. 4. Программы управления электроприводным насосом по частоте вращения и току

При управлении по частоте вращения расход топлива линейно зависит от сигнала управления, а при управлении по току – линейно изменяется перепад давлений на насосе ΔP_n [7].

Динамические характеристики системы подачи при управлении по частоте вращения электродвигателя пэд или по току в обмотках Iэд электродвигателя значительно отличаются временем переходных процессов. На рис. 5 приведены процессы изменения давления за насосом высокого давления P_n при скачкообразном изменении управляющего сигнала, задающего расход топлива с 20% до 100% с разными системами управления. При использовании управления по частоте вращения пэд время перехода составляет 0.2 с (сплошные линии), что вдвое меньше чем при управлении по току Iэд (пунктирные линии).

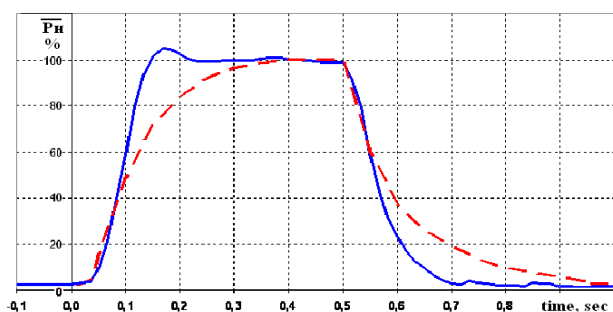


Рис. 5. Статические характеристики электроприводного насоса

Наличие двух алгоритмов управления частотой вращения ЭП позволяет реализовать системы с взаимозаменяемыми электроприводными насосами. На рис. 6 показан один из вариантов схемы отказоустойчивой двухступенчатой топливной системы. Система содержит центробежный насос низкого давления ННД с электроприводом ЭП-Н, шестеренный насос высокого давления НВД с электроприводом ЭП-В, магистраль запуска-перепуска, распределитель топлива РТ, обратные клапаны ОК1 и ОК2 и другие агрегаты. Характеристики ННД и НВД близки по величине максимального расхода. Управление электроприводами осуществляется от электронного цифрового регулятора двигателя ЭЦР-ГТД.

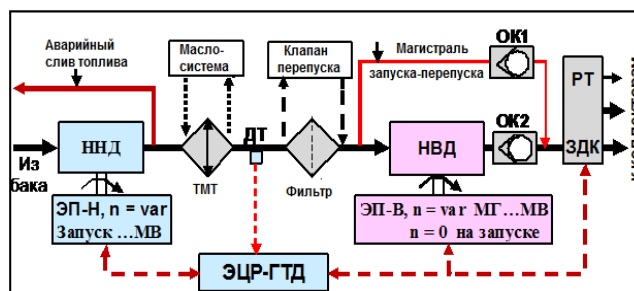


Рис. 6. Структурная схема отказоустойчивой электроприводной системы топливопитания ГТД

При запуске ГТД работает только электропривод ННД. Топливо подается к форсункам двигателя по линии запуска, обеспечивающей перепуск через магистраль, шунтирующую НВД. При этом клапан ОК1 автоматически открывается, а клапан ОК2 – закрывается. После выхода двигателя на режим малого газа запускается электропривод НВД и автоматически открывается клапан ОК2, а клапан ОК1 - закрывается. По командам от регулятора двигателя ЭЦР-ГТД работают оба насоса, обеспечивая подачу топлива в двигатель.

При нормальной работе системы подачи топлива регулятор двигателя ЭЦР-ГТД определяет необходимый для двигателя расход топлива, по величине которого формируется сигнал о необходимой частоте вращения насоса высокого давления НВД. Этот сигнал (уставка) поступает в электропривод ЭП-В насоса НВД и обеспечивает требуемый расход топлива. Одновременно ЭЦР-ГТД формирует сигнал о требуемой величине тока в обмотках электропривода ЭП-Н насоса низкого давления для получения давления на его выходе, достаточного для нормальной работы НВД без кавитации.

При отказе насоса высокого давления регулятор ЭЦР-ГТД формирует сигнал на отключение электропривода ЭП-В и перевод электропривода ЭП-Н насоса низкого давления в режим поддержания частоты вращения, обеспечивающей подачу в камеру сгорания требуемого расхода топлива.

При отказе насоса низкого давления подачу топлива обеспечивает насос высокого давления. Для исключения кавитации НВД регулятор ЭЦР-ГТД переводит НВД на пониженный режим работы двигателя, позволяющий продолжить полет и выполнить посадку самолета.

Отказоустойчивость системы смазки опор ГТД также может быть осуществлена путем ее реконфигурации с помощью специальных клапанов и изменения режима работы насосов. Это дает возможность сохранить подачу масла к подшипникам опор роторов при отказе ЭП нагнетающего насоса путем использования откачивающих насосов для нагнетания.

Примерами построения электроприводных систем ЭГТД могут служить созданный на фирме Rolls–Royce двигатель-демонстратор Trent 500 [1] и разрабатываемый перспективный двигатель «UltraFan» [8]. На этих двигателях полностью исключены неэлектрические системы: электроприводы вращают насосы в системах топливопитания и смазки, генераторы встроены в двигатель, электромеханизмы используются для приводов органов механизации газоздушного тракта двигателя, на задней опоре ТНД Trent 500 установлен магнитный подшипник.

Для разработки систем «электрического» ГТД с необходимыми характеристиками необходимы следующие технологии [2]:

- электроприводы с удельной массой $< 0.2 \dots 0.5$ кг/кВт;
- высокооборотные электрогенераторы с частотой вращения до 50000 об/мин, напряжением постоянного тока 270...540 В и выше;
- высокоинтегрированная термостойкая элементная база, в том числе силовая с интенсивностью отказов $\lambda = 10^{-8} \dots 10^{-9}$ 1/час, $t_{раб} \geq 250^\circ\text{C}$.

IV. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для систем ГТД электроприводы должны строиться на базе бесконтактных электрических машин вентильного типа с магнитоэлектрическим возбуждением, не имеющих вращающихся обмоток на роторе и механического коллекторного узла. Они не требуют частого обслуживания; имеют большую перегрузочную способность по моменту (кратковременно в 5 раз и более); высокий КПД, превышающий 90%; минимальные массу и габариты, значительный срок службы и надежность.

Снижению удельной массы электродвигателей способствует применение схемы с внешним ротором.

В настоящее время основной задачей в области разработки регулируемых электроприводов авиационного применения является экспериментальное подтверждение их отказоустойчивости, ресурса и надежности.

Выполненные в ЦИАМ поисковые исследования, а также работы ведущих мировых разработчиков ЭГТД, показывают, что достигнутый уровень электрических технологий и их прогресс в последние годы позволяет считать осуществимой в ближайшие годы разработку газотурбинных двигателей различного назначения с широким использованием регулируемых электроприводов в его системах.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. J-P. Besnard, F. Blais, M. Martinez, Electrical rotating machines and power electronics for new aircraft equipment systems. 25th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS-2006, Hamburg, Germany, 3-8 September, 2006. 9 p.
2. Гуревич О.С., Гулиенко А.И. Газотурбинный двигатель для «электрического» магистрального самолета – «электрический» ГТД // *Авиационные двигатели*, №1 (2), 2019. С. 7-14.
3. O. Gurevich, A. Gulienko, U. Schurovskiy, Demonstration systems of the «electric» gas turbine engine. 29th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS-2014, St. Petersburg, Russia, 7-12 September, 2014. 6 p.
4. O.S. Gurevich, A.I. Gulienko, V.V. Kotunov, A.V. Livanov, Development and testing of GTE rotor suspension with active and passive magnetic bearings. XXIV International Symposium of Air Breathing Engines, ISABE-2019, Canberra, Australia, 22-27 September, 2019. 10 p.
5. O.S. Gurevich, A.I. Gulienko, Concept to select characteristics of electric drives for fuel supply systems of aircraft gas turbine engines. International Conference on Electromechanical Complexes and Systems, ICOECS-2019, Ufa, Russia, 20-25 October, 2019. 2019ICOECS_paper_58. 3 p.
6. Гуревич О.С., Гулиенко А.И., Щуровский Ю.М. Особенности построения и выбора характеристик электроприводных систем смазки ГТД // *Авиационные двигатели*. 2021. №3 (12). С. 5-18.
7. O.S. Gurevich, A.I. Gulienko, Methods for improving the reliability of fuel supply system of gas turbine engines with using electrically driven pumps. 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, ICAS-2016, Daejeon, South Korea, 25-30 September, 2016. ICAS 2016_0163. 9 p.
8. Rolls-Royce UltraFan. Mobile android application. Rolls-Royce CoDC Development.

Юсуфов Т. А.¹, Фазуллин И. И.¹, Уразбахтин Р. Р.²

¹ПИШ «Моторы будущего»

²ФГБОУ ВО «УУНиТ»

РАЗРАБОТКА АВИАЦИОННОЙ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ¹

Аннотация: Данная статья посвящена разработке гибридной силовой установки ГСУ-80, предназначенной для установки в качестве силового агрегата перспективных беспилотных летательных аппаратов, а также гражданской авиации. В статье описаны технические требования, а также полученные расчетные характеристики двигателя внутреннего сгорания и стартер-генераторной установки.

Ключевые слова: гибридная силовая установка, ГСУ, двигатель внутреннего сгорания, ДВС, стартер-генераторная установка, СТГ.

I. ВВЕДЕНИЕ

На сегодняшний день использование беспилотных летательных аппаратов (БПЛА) – наиболее перспективное направление развития авиации в сфере грузоперевозок на средние (до 5 км.), дальние (до 800 км.) и сверхдальние (до 1200 км.) дистанции с применением неподготовленных площадок или площадок со слабыми грунтами, ввиду обширности территорий РФ с неразвитой транспортной инфраструктурой. К подобным территориям можно отнести регионы крайнего Севера и Сибири. В подобных регионах применение БПЛА, взамен пилотируемой вертолетной техники, востребовано благодаря более низкой себестоимости полета (1 час полета вертолета МИ-8 стоит 139 000 руб. [1], 1 час полета беспилотного воздушного судна составляет не более 6000 руб.) и более гибкому графику, БПЛА несет меньше груза, но требует меньше времени на предполетную подготовку. Использование ДВС в БПЛА наиболее востребовано с увеличением дальности полета, при этом важно отметить, что силовая установка с ДВС превосходит аналогичные установки на основе электрохимических элементов питания по многим параметрам, включая удельную мощность. Согласно исследованию британской фирмы Ernst & Young Global Limited, перспективы использования БПЛА сверхмалой, малой и

¹Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых, тема «АП-ЭМ-02-21-ГБ».

средней дальности в России более 60% потенциала БВС в РФ доступны в полетах за пределами прямой видимости [2].

Однако важно отметить и следующие критические особенности ДВС по сравнению с электромоторами:

1. Использование ДВС в качестве основного источника механической энергии сопряжено с трудностями подвода этой энергии к исполнителю – винту, и ситуация значительно усложняется при использовании системы винтов. В этом случае конструкция трансмиссии становится крайне сложной и тяжелой, что нивелирует все преимущества перед электромоторами.

2. ДВС требовательны к качеству горюче-смазочных материалов, что накладывает свои ограничения на эксплуатацию в неподготовленных условиях.

На сегодняшний день предпринимаются попытки нивелирования особенностей эксплуатации ДВС в БПЛА ввиду их высокой эффективности. Так, например, рассматривается возможность использования ДВС в составе гибридной силовой установки, что позволит использовать высокую удельную мощность ДВС и гибкость электроприводов в плане передачи энергии к потребителю.

Гибридная силовая установка обеспечивает использование характеристик электромоторов такие как мгновенный крутящий момент и скорость выхода на рабочие режимы работы, а также позволяет снизить удельный расход топлива двигателем внутреннего сгорания за счет работы на максимально эффективных режимах.

II. ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

ГСУ-80Д – гибридная силовая установка, включающая в себя следующие системы и агрегаты:

- бензиновый поршневой двигатель внутреннего сгорания (ДВС);
- стартер-генераторная установка (СТГ);
- комбинированный блок управления ДВС и СТГ;
- инвертор (преобразователь);

– аккумуляторная батарея.

Технические требования, предъявляемые к гибридным силовым установкам во многом продиктованы необходимостью замены традиционных силовых установок с двигателем внутреннего сгорания ввиду развития сложных авиационных систем. При этом удельные технические характеристики обеспечиваемые ГСУ не должны уступать ДВС.

Согласно техническим требованиям, полученным на начале разработок, гибридная силовая установка должна стабильно обеспечивать следующие характеристики:

Выходная электрическая мощность ГСУ:

1. на номинальном режиме работы не менее 80 кВт;
2. на пиковом режиме работы не менее 100 кВт.
3. Удельный расход топлива не более 300 г/кВт*ч.
4. Сухой вес установки не более 200 кг.
5. Топливо: автомобильный бензин АИ-95/98 (октановое число не менее 92).
6. Возможность эксплуатации в сложных климатических условиях при температурах - 45... +50 °С.

III. ПОЛУЧЕННЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ СОСТАВНЫХ ЧАСТЕЙ ГИБРИДНОЙ СИЛОВОЙ УСТАНОВКИ

На основе полученных технических требований было выполнено рамочное проектирование как систем двигателя, так и стартер-генератора. На этом этапе было сформулировано ТЗ, согласно которому, были определены основные параметры двигателя внутреннего сгорания, представленные в таблице 1, и стартер-генератора, представленные в таблице 2.

Расчетные параметры двигателя внутреннего сгорания

Наименование параметра	Расчетный показатель
Рабочий объем, см ³	1690
Степень сжатия	10,56:1
Компоновка двигателя	Четырехтактный 4-х цилиндровый двигатель с оппозитным расположением цилиндров
Мощность:	
номинальная (со входным ресивером), кВт (лс) при 5500 об/мин	91 (126)
пиковая (со входным ресивером), кВт (лс) при 6200 об/мин	110 (150)
Крутящий момент:	
взлетный, Нм при 6200 об/мин	160,0
крейсерский, Нм при 5500 об/мин	149,9
*Расход топлива:	
часовой пиковый, л/ч	30,0
часовой номинальный, л/ч	21,0
часовой при 3/4 нагрузки, л/ч	20,5
удельный при максимальном крутящем моменте, г/кВт*ч	238
Максимально допустимая частота вращения КВ, об/мин	6800
Минимальная частота вращения КВ, об/мин.	950
Сухой вес, кг	98

Расчетные параметры стартер-генератора

Параметр	Значения			
1	2			
Режим работы	Генератор		Стартер	
	Ном.	Пик.	Макс. момент срагивания (в течение 2 сек)	Потребный момент (в течение 1 мин)
Выходная мощность, кВт	90,4	112,2	6,6	3,19
Частота вращения, об/мин	5500	6200	1000	
Ток нагрузки, А	265	297,7	-	-
Ток фазы, А	205,2	229,9	73,5	35,4
Напряжение питания, В	-	-	80,6	77,4
Выпрямленное напряжение нагрузки, В	339,3	375,1	-	-
Фазное напряжение нагрузки, В	196	216,5	-	-
Количество полюсов	16			
Количество пазов	48			
Сечение проводника, мм ²	3,142			
Плотность тока, А/мм ²	16,3	18,3	5,8	2,8
Линейная токовая нагрузка, А/м	57754	64706	20686,8	9963,5
Частота перемагничивания, Гц	733,3	826,667	133,333	
КПД (электромагнитный, без учета механических потерь), %	96,2	96,3	93,7	94,7
Марка постоянных магнитов	N45UH, остаточная индукция 1,188 Тл, напряженность 900 кА/м			
Масса магнитопровода статора, кг	6			

<i>1</i>	<i>2</i>
Масса постоянных магнитов, кг	2,6
Масса магнитопровода ротора, кг	2,7
Масса медной обмотки статора, кг	2,6
Масса активной части, кг	14
Длина активной части, мм	85

На основе расчетных параметров в программной среде SolidWorks была построена объемная модель двигателя внутреннего сгорания, представленная на рисунке 1.

Были устранены пространственные конфликты, а также была проработана кинематика движущихся элементов.

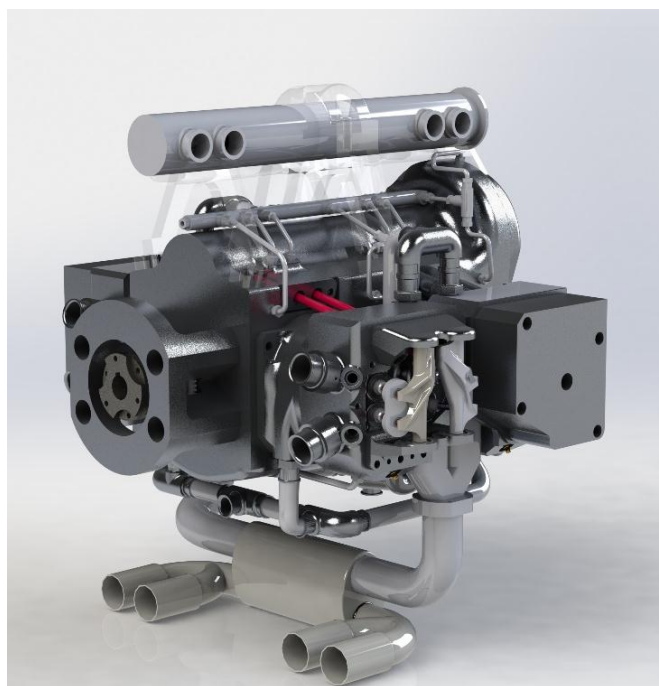


Рис. 1. Объемная модель двигателя ГСУ-80Д

На рисунке 2 представлена объемная модель стартер-генераторной установки. Проектирование осуществлялось в программной среде КОМПАС-3D.

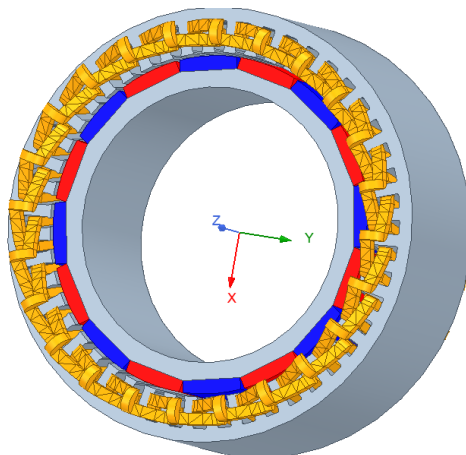


Рис. 2. Объемная модель активной части электрической машины.

Так же были выполнены тепловые расчеты стартер-генераторной установки. При тепловых расчетах принималось, что стартер-генератор охлаждается этиленгликолем, которая движется со скоростью 40 л/мин по корпусу. Тепловой расчет проводился в программных комплексах MOTOR-CAD и Ansys, расхождение между ними составило менее 5%.

Результаты теплового расчета представлены в таблице 3.

Таблица 3

Результаты теплового расчета стартер-генератора

Параметр	Значение
Режим работы	Работа генератора с переходом с номинального режима в пиковый
Температура жидкости	60
Максимальная температура лобовых частей обмотки	214,4
Максимальная температура активной части обмотки	218,5
Температура зубца статора	164,7
Температура спинки статора	142,9
Температура магнитов	132,1

При проектировании гибридной силовой установки были применены следующие конструктивные решения:

1. С целью повышения качества наполнения и продувки камеры сгорания была реализована шатровая четырехклапанная головка цилиндра, что положительно сказалось и на процессе сгорания топлива. Так же подобное решение позволяет заложить возможность для дальнейшего форсирования двигателя за счет установки наддува.

2. Для снижения суммарного веса и габаритных размеров установки было принято решение использовать в качестве маховика ротор стартер-генератора, что привело к значительному повышению массы ротора до 13 кг.

3. При проектировании было решено отказаться от навесного вспомогательного оборудования в пользу выносных автономных электроприводных систем, например помпы системы охлаждения, топливного и масляных насосов. Данное решение в дальнейшем позволит разнести вспомогательное оборудование в полостях планера для обеспечения лучшей развесовки. Проработана возможность замены иностранных комплектующих на аналоги российского или китайского производства.

4. Двигатель разработан с учетом авиационных требований. В головках цилиндров установлены по две свечи зажигания, а также 2 топливные форсунки. Место расположение свечей и форсунок позволяет обеспечить не менее 70% мощности двигателя при работе на дублирующих комплектах.

5. Головки цилиндров механически не связаны друг с другом что значительно снижает нагрузку на элементы крепления, а также обеспечивает ремонтпригодность в полевых условиях за счет замены только одной головки цилиндра, без необходимости съема двигателя и разбора блока цилиндров.

6. Шестеренный привод газораспределительного механизма призван обеспечить отказоустойчивость двигателя.

7. Большая часть конструкции двигателя разработана с учетом возможности изготовления с применением механообрабатывающих центров с ЧПУ.

8. С целью повышения КПД инвертора было принято решение об использовании гибкой муфты значительно снижающей пульсацию мгновенной угловой скорости вращения ротора генератора.

Важно отметить, что разработка конструкторской документации сопровождалась проведением прочностных и газодинамических расчетов в программных средах «SolidWorks», «Ansys», а также в системе имитационного моделирования «Альбея», что позволило значительно сократить срок проектирования за счет снижения трудозатрат на доработку конструкции по результатам расчетов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Оценка экономической эффективности применения БПЛА/ А.Н. Елисеев, Д.М. Федоров, Р.Ю. Кондратьев // Пожарная безопасность: проблемы и перспективы. - Воронеж: ФГБОУ ВО «Воронежский институт Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации последствий стихийных бедствий», 2019. - С. 525.
2. Развитие рынка беспилотных летательных аппаратов 2020/ А.Устименко, Ю.Гедгафов, Ш.Сеймор – Лондон: Ernst & Young Global Limited, 2020. -30 с

Гумеров Х. С., Куликов Г. Г., Ризванов К. А.
УУНиТ

ФОРМИРОВАНИЕ СИСТЕМНОЙ МОДЕЛИ ИССЛЕДУЕМОЙ ПРЕДМЕТНОЙ ОБЛАСТИ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ ЦИФРОВОГО ДВОЙНИКА АВИАЦИОННОГО ГТД ПО ЭКСПЛУАТАЦИОННЫМ ПАРАМЕТРАМ

Аннотация: В рамках ранее разработанной концепции формирования цифровых двойников предлагается ввести семантические и логические ограничения предметной области на примере формирования системной модели ресурса как объекта в предметной области создания ГТД. Разработана структура автоматизированной информационной технологии формализации знаний экспертов по исследуемой предметной области. Приводится методология системного моделирования наукоемких сложных проектов в пространстве 3D - 4D с учетом жизненного цикла. Формирование системной модели ресурса ГТД начинается с технического предложения на его разработку.

Ключевые слова: ГТД, цифровой двойник; системная модель; технический ресурс ГТД; жизненный цикл ГТД; автоматизированная информационная технология.

I. ВВЕДЕНИЕ

Не сложно показать, что процессы технического проектирования новых объектов и процессы их диссертационных исследований в расширенных (новых) предметных областях практически тождественны. Они начинаются с извлечения и формализации экспертных знаний специалистов в исследуемой предметной области. Продемонстрируем это на примере формирования системной модели технического ресурса в предметной области создания газотурбинного двигателя (ГТД). Положим, что эта задача на предпроектном и проектном уровнях будет решаться параллельно и путем диссертационного исследования и оформляться в форме научно – технического отчета и диссертации. Пусть носителями знаний и опыта в данной предметной области выступают профессора (ранее ведущие конструктора ОКБ двигателестроения и электронного агрегатостроения). Их начальный диалог по общему анализу проектного и диссертационного исследований в указанной выше предметной области после записи был формализован в виде слабоструктурированного системного описания [1, 2].

Далее увеличим степень формализации путем разработки автоматизированной информационной технологии знаний экспертов по исследуемой специфике предметной области и знаний содержащихся в самой предметной области. Например, в контексте опыта создания в КБ Мотор и в УНПП Молния изделий 95Ш, 55, КР и их ЭСУ. Такая постановка задачи соответствует технологии извлечения экспертных знаний или формализации знаний экспертным путем из исследуемой предметной области. Главная проблема – это определение границ исследуемой предметной области (ПО) и выбор экспертов для формирования технического задания (ТЗ) научных исследований (НИ) (см. рис. 1).



Рис. 1. Цифровое пространство (универсум) предметной области

II. РЕСУРС ГТД

Определим контекст исследуемой предметной области множеством вопросов, связанных с назначением, расходом, контролем технического ресурса ГТД и его основных электромеханических систем (топливная система, электроагрегаты и др.) в процессе его жизненного цикла (ЖЦ) [3-5].

Ресурс (назначенный, остаточный и др.) – это система, включающая взаимосвязанные параметры ресурсов горячей части двигателя, ресурсов агрегатов и т.д., их учет и анализ по этапам ЖЦ. Одна из базовых задач учета и анализа указанных параметров – это учет и анализ параметров остаточного ресурса [2].

Практический опыт показывает, что продление ресурса ГТД и его электромеханических систем происходит на основе анализа данных ГТД, испытательных стендах предприятия [6]. На рис. 2 приведена мнемосхема продления ресурса ГТД и его электромеханических систем.

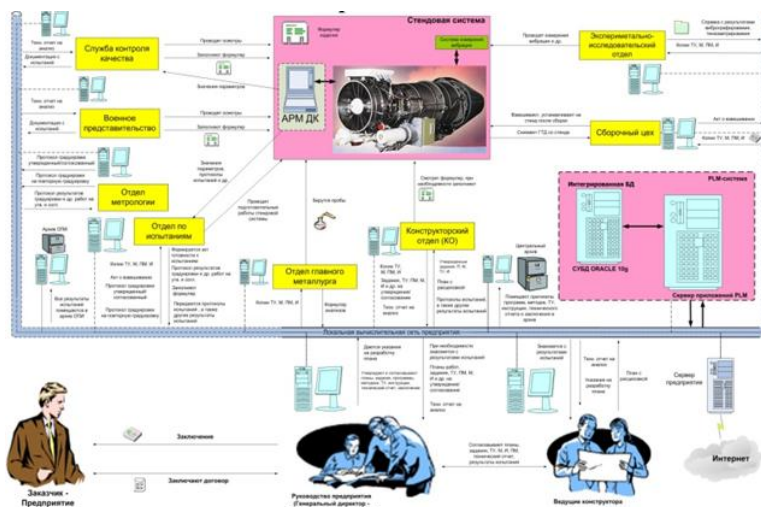


Рис. 2. Мнемосхема продления ресурса ГТД и его электромеханических систем

На рис. 3 приведена декомпозиция функциональной модели процесса продления ресурса ГТД и его электромеханических систем.

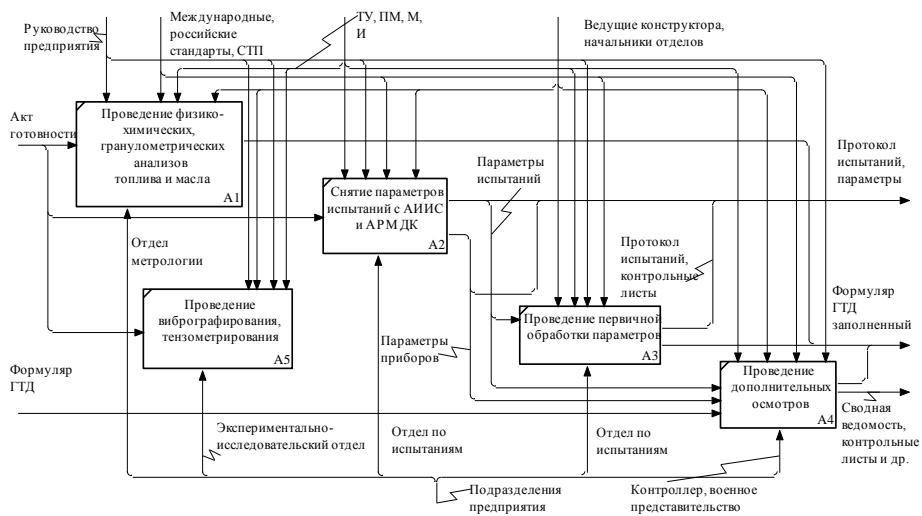


Рис. 3. Декомпозиция функциональной модели продления ресурса при проведении испытания ГТД

На рис. 4 приведена информационная модель продления ресурса ГТД и его основных электромеханических систем.

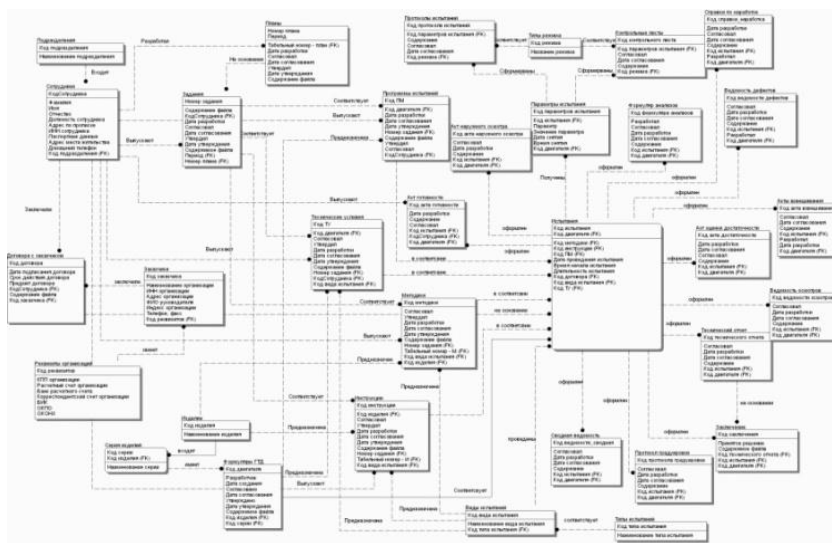


Рис. 4. Информационная модель продления ресурса ГТД и его основных электромеханических систем

На рис. 5 приведен фрагмент динамической BPMN-модели принятия решения продления ресурса ГТД и его основных электромеханических систем.

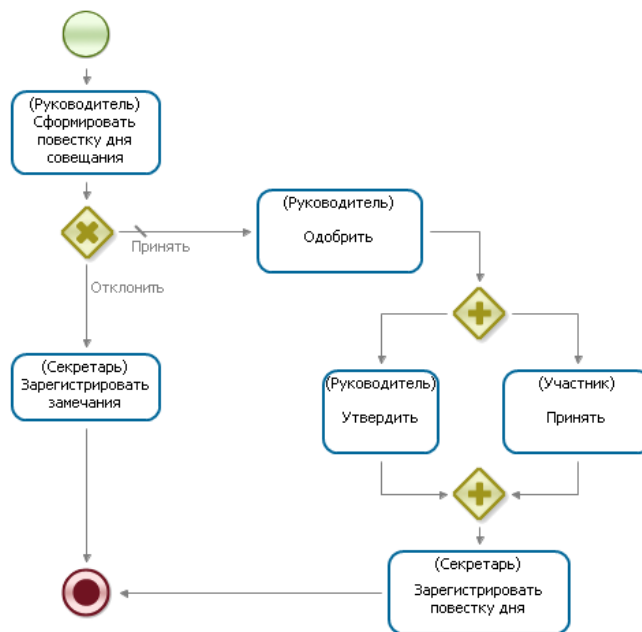


Рис. 5. Фрагмент динамической BPMN-модели организации совещания по продлению ресурса ГТД и его электромеханических систем

На рис. 6 приведен фрагмент технологической архитектуры при продлении ресурса ГТД и его электромеханических систем.

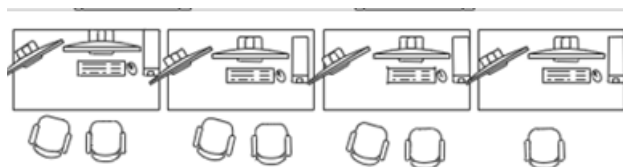


Рис. 6. Фрагмент технологической архитектуры продления ресурса ГТД и его электромеханических систем

На рис. 7 приведен пример реализации системной модели продления ресурса ГТД и его электромеханических систем.

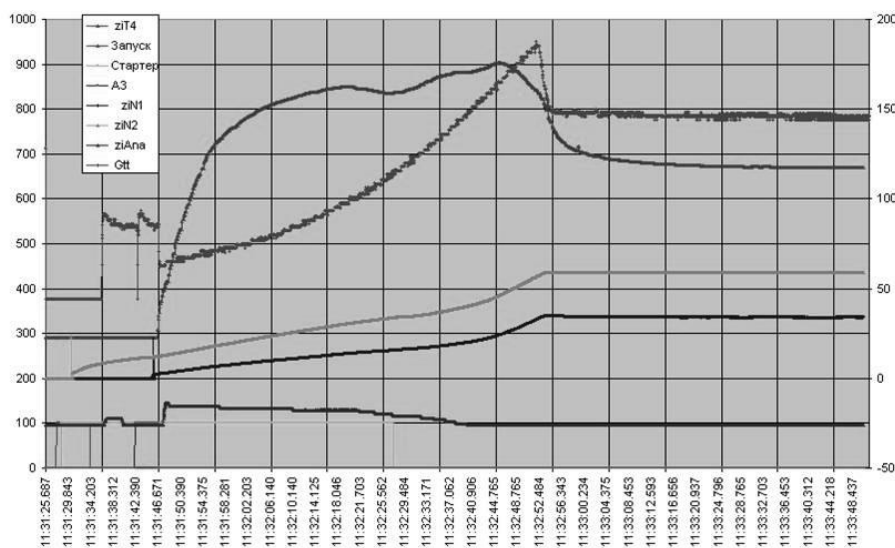


Рис. 7. Фрагмент реализации продления ресурса ГТД и его электромеханических систем

Рассмотрим основные свойства ГТД. К ним можно отнести ресурс, надежность, безотказность, отказоустойчивость, прочность и т.д. Выявленные в ходе анализа предметной области требования, предъявляемые к ГТД по экспертным оценкам, были формализованы с помощью инструментария теории множеств. Требования, предъявляемые к ГТД, можно выразить в виде логического выражения, представленного в формуле 1.

$$f_1(A_1, A_2, A_3, A_4, A_5) = (A_1 \cap A_2 \cap A_3 \cap A_4 \cap A_5), \quad (1)$$

где A_1 – ресурс ГТД;

A_2 – надежность ГТД;

A_3 – безотказность ГТД;

A_4 – отказоустойчивость;

A_5 – прочность ГТД.

С помощью системы wolfram alpha был разработан фрагмент математической модели, представленный на рис. 8.

A1&&A2&&A3 && A4 && A5

NATURAL LANGUAGE MATH INPUT EXTENDED KEYBOARD EXAMPLES UPLOAD compute input

Input

$A1 \wedge A2 \wedge A3 \wedge A4 \wedge A5$

A1 AND A2 AND A3 AND A4 AND A5

$e_1 \wedge e_2 \wedge \dots$ is the logical AND function

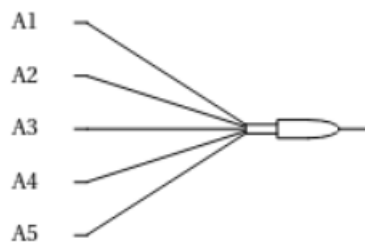
Minimal forms Text notation

DNF	$A1 \wedge A2 \wedge A3 \wedge A4 \wedge A5$
CNF	$A1 \wedge A2 \wedge A3 \wedge A4 \wedge A5$
ANF	$A1 \wedge A2 \wedge A3 \wedge A4 \wedge A5$
NOR	$\neg A1 \vee \neg A2 \vee \neg A3 \vee \neg A4 \vee \neg A5$
NAND	$\neg(A1 \wedge A2 \wedge A3 \wedge A4 \wedge A5)$
AND	$A1 \wedge A2 \wedge A3 \wedge A4 \wedge A5$
OR	$\neg(\neg A1 \vee \neg A2 \vee \neg A3 \vee \neg A4 \vee \neg A5)$

Other forms

ESOP	$A1 \wedge A2 \wedge A3 \wedge A4 \wedge A5$
IMPLIES	$\neg(A1 \Rightarrow (A2 \Rightarrow (A3 \Rightarrow (A4 \Rightarrow \neg A5))))$
ITE	$A1 \wedge A2 \wedge A3 \wedge A4 \wedge A5$

Logic circuit



Venn diagram

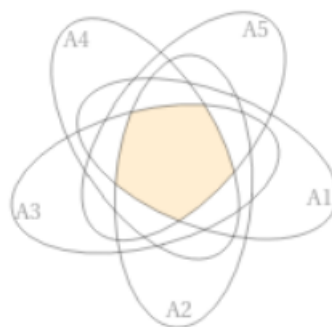


Рис. 8. Фрагмент математической модели продления ресурса ГТД

Программно-аппаратный комплекс для регистрации параметров, разработанный для оценки остаточного ресурса ГТД 95Ш, 195 приведен на рис. 9. Регистрируются установившиеся и переходные режимы в реальном времени на этапе эксплуатации. Это по сути открывает возможность

построения цифрового двойника для оценки остаточного ресурса для эксплуатации ГТД по состоянию.



Рис. 9. Программно-аппаратный комплекс ПАК-ДК-95Ш, 195

Данные рассуждения являются одновременно объективными и виртуальными. Полагаем, что информация о различных аспектах исследуемой предметной области существует в интернет или интранет пространстве. Отметим, что различные информационные системы по своим правилам ее структурируют и идентифицируют для хранения, поиска и т.д. При этом большая часть сопутствующей информации, которая на данный момент не актуальна, аккумулируется в информационные архивы. При необходимости осуществляется извлечение и поиск нужной информации в соответствии с моделью знаний в вопросе, как правило, в вербальной форме. Решается задача извлечения дополнительных знаний, содержащихся в вопросе (или их расширение). При определенных объемах дополнительных знаний возможно их структурирование и интеграция с моделью знаний, содержащихся в вопросе. Это соотносится с действием общего закона предельной эффективности.

Действительно, архивы ОКБ хранят множество различных вариантов проработки технических решений, хотя, как правило, анализируется только один.

Сегодня можно в доступной форме формализовать опыт эксперта с момента задания требуемых показателей системной модели ресурса в техническом предложении и техническом задании на разработку.

Сформулированную идею целесообразно рассматривать в качестве алгоритма процесса формирования технического решения на создание системы в целом и ее подсистем. Это общий подход декомпозиции (детализации) технических решений. Например, для конкретной исследуемой задачи формирования технического ресурса ГТД виртуально создается системная модель, начиная с этапа технического задания, которая совершенствуется на последующих этапах ЖЦ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Куликов Г. Г., Речкалов А. В., Артюхов А. В. Методология системного моделирования адаптивного управления машиностроительным производством // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, No 4. С. 115–125. DOI: 10.14529/ctcr200412. [G. G. Kulikov, A. V. Rechkalov, A. V. Artyukhov, “Methodology of system modeling of adaptive management of machine-building production”, (in Russian), in Vestnik YuUrGU. Seriya “Komputernye tehnologii, upravlenie, radioelektronika”, vol. 20, no. 4, pp. 115-125, 2020. DOI: 10.14529/ctcr200412.]
2. Логиновский О.В., Ризванов К.А., Куликов Г.Г. Применение BI-принципов в гейтовой системе управления проектом создания цифрового двойника ГТД // Вестник ЮУрГУ. Серия «Компьютерные технологии, управление, радиоэлектроника». 2020. Т. 20, No 1. С. 16–26. DOI: 10.14529/ctcr200102. [O.V.Loginovskiy, K.A.Rizvanov, G.G.Kulikov, “Application of BI-principles in the gate project management system to create a digital twin of the GTE”, (in Russian), in Vestnik YuUrGU. Seriya “Komp'yuternye tekhnologii, upravlenie, radioelektronika”, vol. 20, no. 1, pp. 16-26, 2020. DOI: 10.14529/ctcr200102.]
3. Скибин В. А. Работы ведущих авиадвигателестроительных компаний по созданию перспективных авиационных двигателей (Аналитический обзор) / под общ. ред. В. А. Скибина, В. И. Солонина. М. : ЦИАМ, 2004. 424 с.
4. Кеба И.В. Диагностика авиационных газотурбинных двигателей/ И. В. Кеба. М. :Транспорт, 1980. 248 с.
5. Мокроус М.Ф. Применение методов диагностической обработки и анализа термогазодинамических параметров при стендовых испытаниях авиационных ГТД / М. Ф. Мокроус //Испытания авиационных двигателей:межвуз. науч. сб. Уфа : УАИ. 1977. No 5. С. 164.
6. Гумеров, Х.С. Научно-исследовательская и экспериментальная работа по разработке методов и программного обеспечения анализа состояния двигателя Р95Ш : науч.-техн. отчет(заключительный) / Х. С. Гумеров, И. В. Салимов [и др.]. Уфа : УГАТУ, 2004.

Кадыров А. А.¹, Уразбахтин Р. Р.²

¹АО «УППО»

²ФГБОУ ВО «УУНиТ»

ПОДГОТОВКА ВЫСОКОКВАЛИФИЦИРОВАННЫХ КАДРОВ ДЛЯ ПРЕДПРИЯТИЙ-РАЗРАБОТЧИКОВ И ПРЕДПРИЯТИЙ-ИЗГОТОВИТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ПО МОДЕЛИ СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО¹

Аннотация. В настоящей работе рассмотрена Подготовка высококвалифицированных кадров для предприятий-разработчиков и предприятий-изготовителей электрооборудования по модели студенческого конструкторского бюро. В первой главе определяются функции и задачи студенческого конструкторского бюро. Во второй главе рассматривается отбор сотрудников, формируется подход к адаптации и обучению сотрудников студенческого конструкторского бюро с момента трудоустройства. В третьей главе рассматривается организация работы в студенческом конструкторском бюро. В четвертой главе рассматривается рабочее пространство студенческого конструкторского бюро. В заключении приводятся планы по развитию студенческого конструкторского бюро и делаются выводы по перспективам подготовки высококвалифицированных кадров для предприятий-разработчиков и предприятий по серийному производству электрооборудования по модели студенческого конструкторского бюро.

Ключевые слова: квалификация, навыки, умения, студенческое конструкторское бюро, высокотехнологичное предприятие, кадры.

I. ВВЕДЕНИЕ

Сегодня после окончания высшего учебного заведения (ВУЗа), выпускники не всегда могут сразу приступить к выполнению своей работы, в том числе при трудоустройстве по своей специальности. Это обусловлено несоответствием их квалификации потребностям предприятий. Вышесказанное справедливо в том числе для предприятий по серийному производству и предприятий-разработчиков электрооборудования. Наличие разрыва между образованием и необходимыми профессиональными компетенциями и навыками подчеркивает Президент Российского союза промышленников и предпринимателей Александр Николаевич Шохин: «Разрыв, безусловно, существует. Однако объективных методик его определения нет. Мы можем опираться только на косвенные данные и экспертные мнения. Надо понимать,

¹Работа выполнена в рамках гранта в форме субсидий в области науки из бюджета Республики Башкортостан для государственной поддержки молодых ученых, тема «АП-ЭМ-02-21-ГБ».

что каким бы этот разрыв ни был, всегда надо стремиться его сократить. В этом процессе нельзя останавливаться [1]».

На устранение разрыва между образованием и профессиональными компетенциями направлен ряд мер. Например, создаются профессиональные стандарты, устанавливающие требования к квалификации работника [2]. Эти стандарты используются при создании программ высшего профессионального образования, что позволит добиться квалификации выпускников, достаточной для выполнения задач в рамках своей специальности. На решение обозначенной проблемы также направлен национальный проект «Наука и университеты» [3], в рамках которого существует инициатива «Развитие интеграционных процессов в сфере науки, высшего образования и индустрии», созданная в том числе для организации плотного взаимодействия между ВУЗами и промышленными предприятиями Российской Федерации. Указанные меры в перспективе позволят добиться желаемого эффекта, однако, они являются долгосрочными.

На фоне нестабильной политической и экономической обстановки в мире, перед предприятиями Российской Федерации появился вызов в кратчайшие сроки нарастить объемы существующих и организовать производство новых стратегически важных изделий. Это накладывает необходимость в рассматриваемом вопросе помимо долгосрочных мер применять краткосрочные меры, так как разрыв между образованием и профессиональными компетенциями является одним из тормозящих фактором для быстрого развития реального сектора экономики.

Министерством науки и высшего образования в 2022 году был инициирован проект «Передовые инженерные школы» (ПИШ), цель которого – обеспечить высокопроизводительные экспортно-ориентированные секторы экономики страны высококвалифицированными кадрами для достижения технологической независимости, создавать новейшие виды высокотехнологичной продукции в партнерстве с высокотехнологичными компаниями Российской Федерации [4]. Особенностью проекта является

достижение определенных результатов уже к 2024 году, то есть в краткосрочной перспективе, что наилучшим образом соответствует ожиданиям промышленных предприятий Российской Федерации. Таким образом, перспективным является сокращение разрыва между образованием и профессиональными компетенциями в рамках деятельности ПИШ.

В рамках настоящего проекта ПИШ «Моторы Будущего» создана в ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет» (ФГБОУ ВО «УГАТУ») и его правопреемнике ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий» (ФГБОУ ВО «УУНиТ»). Одной из ключевых задач ПИШ «Моторы Будущего» является выпуск высококвалифицированных инженеров с компетенциями, знаниями и опытом для успешной и быстрой вовлеченности в работу высокотехнологичных партнеров и в решение задач общемировой научной повестки. Для сокращения разрыва между образованием и профессиональными компетенциями в ПИШ «Моторы Будущего» создаются студенческих конструкторских бюро (СКБ).

В статье авторами исследуется взаимодействие высокотехнологичных предприятий Российской Федерации с ВУЗами на примере СКБ «УППО-УГАТУ» ПИШ «Моторы Будущего» и рассматривается процесс подготовки высококвалифицированных кадров для предприятий-разработчиков и предприятий по серийному производству электрооборудования по модели СКБ. В первой главе определяются функции и задачи СКБ «УППО-УГАТУ». Во второй главе формируется подход к адаптации и обучению сотрудников СКБ «УППО-УГАТУ» с момента трудоустройства. В третьей главе рассматривается организация работы в СКБ «УППО-УГАТУ», в том числе вопросы использования программного обеспечения. В четвертой главе рассматривается рабочее пространство СКБ «УППО-УГАТУ». В пятой главе обозначены основные траектория развития СКБ «УППО-УГАТУ». В заключении приводятся планы по развитию СКБ «УППО-УГАТУ» и делаются выводы по перспективам подготовки высококвалифицированных

кадров для предприятий-разработчиков и предприятий по серийному производству электрооборудования по модели СКБ.

II. ФУНКЦИИ И ЗАДАЧИ СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО

СКБ «УППО-УГАТУ» было создано в августе 2022 года как структурное подразделение ПИШ «Моторы Будущего». СКБ «УППО-УГАТУ» создано на базе АО «Уфимское приборостроительное производственное объединение» (АО «УППО»), занимающегося разработкой, модернизацией и изготовлением электрооборудования различного назначения, и ФГБОУ ВО «УГАТУ» и его правопреемника ФГБОУ ВО «УУНиТ», реализующего деятельность научно-исследовательскую деятельность и деятельность в рамках подготовки кадров с высшим образованием. СКБ «УППО-УГАТУ» базируется на площадях ФГБОУ ВО «УГАТУ» и его правопреемника ФГБОУ ВО «УУНиТ». СКБ «УППО-УГАТУ» осуществляет свою деятельность в интересах АО «УППО».

АО «УППО» – высокотехнологичное предприятие Российской Федерации, входящее в АО «Концерн Радиоэлектронные технологии», занимающееся разработкой и выпуском авиационного электрооборудования, изделий производственно-технического назначения и гражданской продукции. Сегодня основная задача АО «УППО» как производителя электрооборудования – обеспечить импортнезависимость Российской Федерации в части выпускаемой номенклатуры продукции. В связи с этим происходит динамичное развитие предприятия АО «УППО», включающее в себя модернизацию производства и инженерного блока, увеличение штата производственного и инженерного персонала. Это в свою очередь обуславливает потребность АО «УППО» в высококвалифицированных инженерных кадрах, которые после окончания ВУЗа могут сразу же приступить к выполнению работ в рамках проектирования и конструирования радиоэлектронной аппаратуры. На основании вышесказанного руководством АО «УППО» было принято решение организовать подготовку высококвалифицированных кадров по

модели СКБ. Таким образом, функции и задачи СКБ «УГАТУ-УППО» определяются целями и задачами АО «УППО».

Основная задача СКБ «УППО-УГАТУ» – подготовка высококвалифицированных кадров для высокотехнологичного промышленного предприятия, в чьи функции в том числе входит разработка электрооборудования. Отличительной особенностью подготовки кадров по модели СКБ является вовлеченность студентов в работу предприятий со времени обучения в университете. Одновременное прохождение теоретического курса в ВУЗе и выполнение практических задач в рамках работы в СКБ существенно повышает квалификацию студента, расширяет спектр его навыков и умений. Также задачами СКБ «УППО-УГАТУ» являются: (1) выполнение заданий по линии главного конструктора АО «УППО»; (2) выполнение заданий по линии главного технолога АО «УППО»; (3) проведение научно-исследовательских работ (НИР), в том числе инициативных; (4) снижение трудовых и временных затрат АО «УППО» на выполнение специфических задач. Таким образом, помимо подготовки высококвалифицированных кадров, готовых сразу после окончания ВУЗа приступать к работе на курирующем предприятии, СКБ может разгружать курирующее предприятие за счет наличия зеркальных относительно предприятия специалистов, выполняющих задания курирующего предприятия. Необходимо отметить, что уровень сложности заданий в данном случае должен определяться в зависимости от уровня подготовки сотрудников СКБ, что будет подробнее рассмотрено далее в статье. Под выполнением специфических задач подразумевается, например, апробация подходов к проектированию или конструированию, создание вспомогательных изделий, которые теоретически могут повысить эффективность работы курирующего предприятия, но при этом займут у курирующего предприятия время, которое могло бы быть направлено на решение основных задач. Задания, выполняемые сотрудниками СКБ, являются частью их образовательного процесса и позволяют заблаговременно адаптироваться к будущей работе на курирующем предприятии.

Функции СКБ «УППО-УГАТУ» вытекают из задач. Таким образом, функциями СКБ «УППО-УГАТУ» являются: (1) обучение и профессиональная ориентация студентов; (2) выполнение 3d моделей деталей, сборочных единиц и изделий; (3) выполнение конструкторской документации согласно ЕСКД; (4) разработка технологических процессов; (5) выполнение технологической документации согласно ЕСТД; (6) трассировка печатных плат; (7) разработка электрических принципиальных схем отдельных функциональных узлов и устройств; (8) публикация работ и оформление прав на результаты инновационной деятельности в рамках научно-исследовательских работ. Выполнение всех вышеперечисленных функций позволяет сотрудникам СКБ получить достаточную квалификацию и широкий набор навыков, необходимых для дальнейшей работы на курирующем предприятии.

III. ОТБОР, АДАПТАЦИЯ И ОБУЧЕНИЕ СОТРУДНИКОВ СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО

Организационная структура СКБ «УППО-УГАТУ» строится следующим образом. Студенты делятся на две тематические группы. Первая группа студентов выполняет работы по линии радиоэлектронной аппаратуры. Вторая группа студентов выполняет задания по линии механических деталей и сборочных единиц, различных технологических процессов. Таким образом, две группы студентов способны выполнять полный цикл задач в рамках проектирования, конструирования и разработки технологии на изделия радиоэлектронной аппаратуры. Руководство группами студентов осуществляет руководитель СКБ. Помощь в руководстве студенческими группами и исполнение обязанностей руководителя в отсутствие руководителя СКБ возлагаются на заместителя руководителя СКБ. На этапе открытия СКБ «УППО-УГАТУ» было принято решение отвести по два студента на работу в каждой из групп.

Студенты на трудоустройство в СКБ «УППО-УГАТУ» отбирались на основании очного собеседования и вступительного конкурса. Конкурс проводился среди студентов 3 и 4 курсов бакалавриата, 3, 4 и 5 курса

специалитета. В рамках собеседования со студентами делался вывод об их текущем уровне знаний и умений, и, соответственно, об их способности к выполнению трудовых функций. Собеседование проводилось руководителем СКБ, куратором СКБ со стороны производственного предприятия и директором ПИШ «Моторы Будущего». Если по результатам собеседования знания и умения студентов признавались достаточными, студент проявлял интерес к выполнению обговоренных в рамках собеседования задач, студенту выдавались экзаменационные задания. Экзаменационные задания делились на три блока: (1) тестовая часть; (2) задание по выполнению конструкторской документации; (3) задание по выполнению 3d модели. Тестовая часть составлена с учетом рекомендаций [5]. Задания тестовой части содержали базовые вопросы по выполнению конструкторской документации, теоретическим основам электротехники, радиоэлектронике. Настоящий набор тем обусловлен спецификой работы курирующего предприятия. Тестовая часть позволяла студентам набрать 25 баллов, 1 балл за каждый правильный ответ. Пример тестового задания представлен на рис. 1.

Экзамен для трудоустройства в СКБ «УППО-УГАТУ»
Тестовая часть

Выполнил: _____ Контактный тел.: _____
Университет: _____ Специальность: _____ Курс: _____

Для тестовых вопросов возможно несколько правильных ответов. Букву (буквы), обозначающую правильный ответ (ответы), необходимо обвести в кружок. В вопросах, где необходимо установить соответствие, соедините соответствующие ответы в правом и левом столбце линией.

1. Конструкторская документация – это _____ документы, которые в совокупности или в отдельности, определяют состав и устройство изделия и содержат необходимые данные для его разработки, изготовления, контроля, эксплуатации, ремонта и утилизации. Выберите слово (слова), которые должны находиться на месте пропуска:

- а) текстовые;
- б) электронные;
- в) графические и текстовые;
- г) графические.

2. Отображаются ли на электрической принципиальной схеме связи между элементами радиоэлектронного устройства?

- а) да;
- б) нет.

Рис. 1. Пример задания из тестовой части

Часть по выполнению конструкторской документации представляла собой два задания на выполнение электрических принципиальных схем в программе Компас-3d. Студентам необходимо было изучить условно-

графические обозначения радиоэлементов, после чего заменяя свободные места в шаблоне электрической принципиальной схемы на условно-графические обозначения элементов составить электрическую принципиальную схему. За выполнение каждого из заданий студент мог получить 5 баллов. Пример задания из части по выполнению конструкторской документации приведен на рис. 2.

1. На основе графического изображения чертежа и пояснения к нему воссоздайте электрическую принципиальную схему устройства в программном обеспечении «Компас-3d» в соответствии с ГОСТ 2.702-75. Вместо кружка с цифрой Вам необходимо начертить условное графическое изображение элемента под соответствующей цифрой.

Графическое изображение чертежа

Пояснение

1. Предохранитель плавкий;
2. Амперметр;
3. Розетка;
4. Выключатель однополюсный;
5. Вольтметр;
6. Лампа накаливания;
7. Переменный резистор;
8. Зажим.

Рис. 2. Пример задания из части по выполнению конструкторской документации

Часть по выполнению 3d модели состояла из задания по созданию твердотельной 3d модели на основании эскиза и размеров детали в программе Компас-3d. По созданной 3d модели необходимо было создать ассоциативный чертеж с простановкой необходимых размеров. За выполнение каждого из заданий студент мог получить 5 баллов. Пример задания из части по выполнению 3d модели приведен на рис. 3.

1. На рисунке представлена трехмерная модель детали, на которой проставлены размеры. Вам необходимо с использованием программного обеспечения «Компас-3d» воссоздать трехмерную модель детали с заданными размерами.

2. По созданной детали трехмерной модели детали Вам необходимо создать чертеж, по которому данную деталь можно будет изготовить. На чертеже необходимо расставить размеры детали. Технические требования, шероховатости, допуски и материал на чертеже указывать не нужно.

Рис. 3. Пример задания из части по выполнению 3d-модели

По результатам выполнения экзаменационных заданий студент мог набрать максимум 45 баллов. Решение о приеме кандидатов на работу осуществлялось на основе балльно-рейтенговой системы.

Составленные экзаменационные задания позволяют оценить полный набор знаний и навыков студентов, изъявивших желание трудоустроиться в СКБ «УППО-УГАТУ». Тестовая часть позволяет оценить теоретические знания в области радиоэлектроники и выполнения конструкторской документации. Часть по работе с конструкторской документации позволяет оценить знание правил выполнения чертежей, в том числе электрических принципиальных схем, и работе с чертежами в программе Компас-3d. Часть по работе с 3d моделью позволяет оценить умение создавать объемные твердотельные модели знание правил выполнения чертежей. На момент 30.08.2022 конкурс в СКБ «УППО-УГАТУ» на 1 вакантное место составил более 4,5 человек, что показывает интерес студентов к раннему началу трудовой деятельности по своей специальности и заинтересованности в перспективе трудоустройства на высокотехнологичное предприятие Российской Федерации. Необходимо отметить, что наибольший интерес к трудоустройству наблюдался среди студентов 3 курса обучения. Это может быть обусловлено тем, что у студентов 1 и 2 курса обучения недостаточно знаний и умений для начала выполнения необходимых трудовых функций, существует боязнь не справиться с поставленными задачами, а у студентов 5 курса имеется трудоустройство или определенность с будущим трудоустройством. Трудоустройство в СКБ студентов 3 курса является оптимальным, так как им предстоит от 1 до 2,5 лет работы в СКБ перед трудоустройством на курирующее предприятие, что с учетом периодов адаптации и обучения (3...3,5 месяца) достаточно для начала самостоятельного выполнения заданий от курирующего предприятия во время работы в СКБ.

После отбора четырех студентов для них была разработана и проведена адаптационная программа. Студенты знакомы с деятельностью ВУЗа, после прохождения собеседования и вступительного экзамена имеют представление о

своих будущих рабочих местах и трудовых обязанностях. При этом студенты не знакомы с предприятием, курирующем СКБ. Для части прошедших конкурсный отбор студентов трудоустройство в СКБ является первым трудоустройством. Поэтому в настоящем случае было решено провести адаптационную программу на территории АО «УППО». Это необходимо для лучшего понимания сотрудниками своей работы, получения представления о задачах и функциях курирующего предприятия, знакомства с куратором и контактными лицами со стороны предприятия. В целом, проведение адаптационной программы для новых сотрудников СКБ способствует их вовлеченности в рабочий процесс, повышает эффективность их работы [6]. На рис. 4. представлены этапы адаптационной программы сотрудников СКБ «УППО-УГАТУ».



Рис. 4. Этапы адаптационной программы сотрудников

На 1 этапе адаптационной программы коллектив СКБ «УППО-УГАТУ» посетил курирующее предприятие. Сотрудниками АО «УППО» была проведена презентация предприятия, в которой было рассказано об истории предприятия

и видах деятельности предприятия, была проведена экскурсия по музею предприятия, на которой демонстрировалась продукция предприятия. Ознакомительный день адаптационной программы повысил интерес коллектива СКБ к выполнению задач, что объясняется пониманием практической значимости работ СКБ.

На 2 этапе адаптационной программы было проведено ознакомление коллектива СКБ «УППО-УГАТУ» с конструкторской подготовкой производства, что включало в себя демонстрацию рабочих мест конструкторов, а также объяснение специфики работы конструкторов отдельной направленности (рассматривались: работа конструктора при освоении нового изделия и при серийном сопровождении изделия; работа инженеров-конструкторов по печатным платам, по механике и по электронике; работа инженера-программиста). Для студентов из первой группы второй день адаптационной программы позволил близко познакомиться с их будущей трудовой деятельностью.

На 3 этапе адаптационной программы было проведено ознакомление коллектива СКБ «УППО-УГАТУ» с технологической подготовкой производства, что включало в себя демонстрацию рабочих мест технологов и объяснение задач технологов по различным направлениям (по механическому производству, по сборочно-монтажным операциям). Также было рассказано про работу конструктора по оснастке. Для студентов из второй группы второй день адаптационной программы позволил близко познакомиться с их будущей трудовой деятельностью.

На 4 этапе было произведено знакомство коллектива СКБ «УППО-УГАТУ» с производством. Были проведены экскурсии по производственным участкам предприятия с демонстрацией работы оборудования.

Объем информации 1, 2, 3 и 4 этапов адаптационной программы является достаточно большим для студентов, которые только приступают к решению задач курирующего предприятия, поэтому было принято решение о переносе 5 этапа адаптационной программы на более поздний срок. Это объясняется тем,

что на 5 этапе адаптационной программы предусмотрено изучение документооборота, PDM-системы, PLM-системы и ERP-системы курирующего предприятия. Для понимания этих тем сотрудники СКБ должны иметь уверенные знания касательно цикла разработки изделия, жизненного цикла изделия, номенклатуры конструкторской и технологической документации. Эти знания будут приобретены студентами по результатам первого года работы в СКБ.

Прохождение коллективом СКБ «УППО-УГАТУ» адаптационной программы дало положительный эффект с точки зрения ознакомления сотрудников с их будущей работой, повысило интерес к началу выполнения заданий.

Далее было организовано обучение студентов. Для этого были разработаны задания для каждой группы студентов. Для первой группы студентов обучающим заданием стало разработка автономного датчика дыма с возможностью сетевого подключения, для второй группы студентов – разработка 3d модели и технологии изготовления детали (тела вращения, до 30 линейных размеров). Темы обучающих заданий были определены так, чтобы они согласовались с темами научно-исследовательских работ студентов. По результатам научно-исследовательских работ студенты могут оформлять права на результаты интеллектуальной деятельности, публиковать статьи. В перспективе это позволит им выигрывать коллективные и индивидуальные конкурсы, гранты, что будет способствовать повышению престижа курирующего предприятия и статуса СКБ. Студентам первой группы в рамках обучения было необходимо составить электрическую принципиальную схему и перечень компонентов для нее, закупить необходимые компоненты, собрать и отладить схему на макетной плате, сделать проект печатной платы, разработать 3d модель изделия и выпустить на него комплект конструкторской документации. На сегодняшний день студенты первой группы близки к завершению обучения, находятся на стадии создания 3d модели изделия. В результате выполнения задания ими будут получены навыки разработки

простых электрических принципиальных схем, подбора радиоэлектронных компонентов, трассировки печатных плат, выполнения 3d моделей и конструкторской документации на изделие. Студентам второй группы обучения необходимо создать 3d модель детали, выполнить на нее конструкторскую и технологическую документацию. По результатам обучения ими будут получены навыки выполнения 3d моделей и конструкторской документации, выполнения технологической документации. Таким образом, по результатам обучения студентами обеих групп будут получены все необходимые для выполнения заданий курирующего предприятия знания и навыки.

IV. ОРГАНИЗАЦИЯ РАБОТЫ В СТУДЕНЧЕСКОМ КОНСТРУКТОРСКОМ БЮРО

Параллельно с адаптацией и обучением коллектива СКБ «УППО-УГАТУ» происходила организация работы СКБ. Основная сложность организации работы СКБ – удаленность СКБ от курирующего предприятия. Месторасположение СКБ на территории ВУЗа обусловлено тем, что студенты должны посещать занятия в ВУЗе, согласно свободному времени в расписании студенты приходят для выполнения заданий и научно-исследовательских работ в СКБ. Соответственно, расположение СКБ на территории ВУЗа минимизирует потери времени студентов.

Задания для СКБ «УГАТУ-УППО» передаются от АО «УППО» через куратора или напрямую от лиц, за которыми закреплена необходимость выполнения этих заданий. Для удобства передачи заданий и проверки их результатов, а также для обмена результатами по научно-исследовательским работам, создания библиотеки литературы и так далее на сервере ПИШ «Моторы Будущего» была создана общая папка. Доступ в папку есть у всех сотрудников СКБ «УППО-УГАТУ» и ряда сотрудников АО «УППО», участвующих в передаче заданий и проверке результатов их выполнения. Структура общей папки показана на рис. 5.

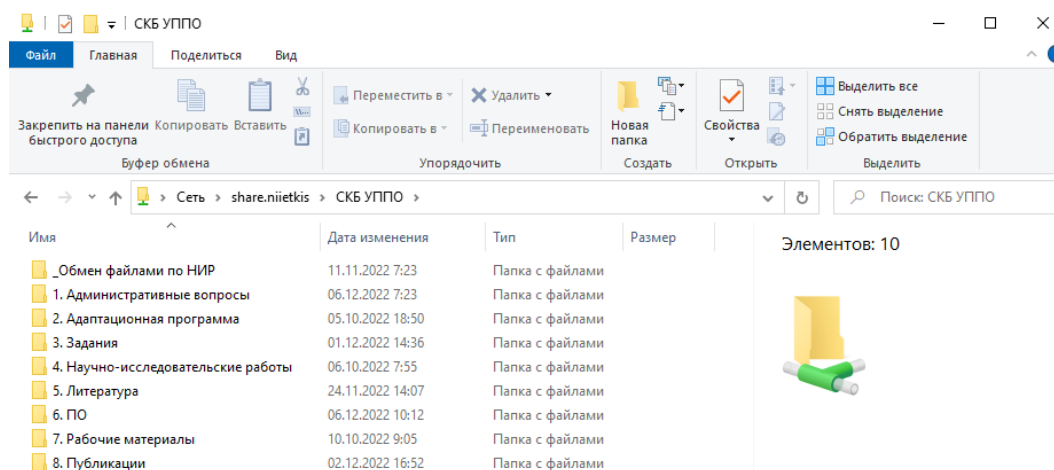


Рис. 5. Структура общей папки СКБ «УППО-УГАТУ»

В папке административные вопросы хранятся формы планирования и отчетности по деятельности СКБ. В папке адаптационная программа хранятся материалы по адаптации сотрудников, отчеты сотрудников о прохождении адаптационной программы. В папке задания хранятся задания от курирующего предприятия и результаты их выполнения. В папке научно-исследовательские работы хранятся результаты научно-исследовательских работ студентов. В папке литература хранятся стандарты, справочники, учебные пособия, книги и прочая литература, которую сотрудники СКБ изучают в рамках самообучения или к которой обращаются во время выполнения заданий курирующего предприятия. В папке ПО хранятся установочные файлы программного обеспечения, которое используется при выполнении заданий и проведении научно-исследовательских работ. В папке рабочие материалы созданы именные папки для каждого сотрудника, где они могут хранить промежуточные результаты своих работ. В папке публикации собираются результаты интеллектуальной деятельности и статьи, которые направляются на публикацию сотрудниками СКБ. Такое устройство папки удобно для сотрудников СКБ и курирующего предприятия, объем содержащейся информации достаточен для планомерного выполнения заданий и контроля.

Передача заданий от курирующего предприятия в СКБ, сроки получения и выполнения заданий, а также ответственные лица записываются в файле

«Форма планирования и отчетности». Структура формы планирования и отчетности представлена на рис. 6.

Форма планирования и отчетности обновляется ежедневно. Форма планирования и отчетности составлена так, чтобы были явно видны реальные сроки получения и выполнения заданий, а также проверки результатов их выполнения. Задания, выполняемые СКБ, могут быть типовыми, поэтому после выполнения задания становится очевидным, сколько времени уходит на его выполнение и сколько времени уходит на его проверку. Также Форма планирования и отчетности снимает вопросы по определению лиц, ответственных за выдачу и выполнение заданий.

Форма планирования и отчетности СКБ-УППО														
№	Задание	Этапы	Дата получения задания	Ф.И.О исполнителя	Промежуточная оценка/состояние работ (в % + дата)	Дата передачи на проверку	Дата принятия результатов работ	Ф.И.О куратора АО "УППО"	Вид отчетного документа	Срок исполнения в плановой	Срок исполнения фактический	Кол-во дней	Кол-во часов	Примечание
1.	Разработать 3D - модель и чертёж детали	1.1. Разработать 3D - модель	*29.09.2022	Галиев Р.Д.	100%, 03.10.2022	04.10.2022	25.11.2022	Иванова Т.П.	3D-модель (.m3d)	05.10.2022				
		1.2. Разработать чертёж детали	*29.09.2022	Галиев Р.Д.	100%, 03.10.2022	04.10.2022	25.11.2022	Иванова Т.П.	чертёж детали в соответствии с ЕСКД (.cdw)	12.10.2022				
2.	Разработать 3D - модель и чертёж детали	2.1. Разработать 3D - модель	*29.09.2022	Мустафин Р.З.	100%, 03.10.2022	04.10.2022	25.11.2022	Иванова Т.П.	3D-модель (.m3d)	05.10.2022				
		2.2. Разработать чертёж детали	*29.09.2022	Мустафин Р.З.	100%, 04.10.2022	04.10.2022	25.11.2022	Иванова Т.П.	чертёж детали в соответствии с ЕСКД (.cdw)	12.10.2022				
3.	Разработать 3D - модель и чертёж детали с учетом изменения метода изготовления с литья на изготовление на станке с ЧПУ. Рамка	3.1. Разработать 3D - модель	*29.09.2022	Низаметдинов И.А., Мустафин Р.З., Уразбахтин Р.Р.	100%, 13.10.2022	13.10.2022	25.11.2022	Иванова Т.П.	3D-модель (.m3d)	14.10.2022				
		3.2. Разработать чертёж детали и внести изменения в чертёж	*18.10.2022	Мустафин Р.З., Низаметдинов И.А., Уразбахтин Р.Р.	100%, 18.10.2022	28.10.2022	25.11.2022	Иванова Т.П.	чертёж детали в соответствии с ЕСКД (.cdw)	21.10.2022				Переезд в аудиторию 4-118 завершен 28.10.2022

Рис. 6. Форма планирования и отчетности

За каждое задание закрепляется ответственное лицо со стороны курирующего предприятия. При возникновении вопросов по выполнению задания сотрудники СКБ обращаются напрямую к ответственному лицу. Это минимизирует сроки решения возникающих вопросов и, соответственно, выполнения заданий. Для лучшего понимания работы сотрудники СКБ могут по мере необходимости встречаться с ответственными лицами на курирующем предприятии, при этом могут, например, демонстрироваться детали, на которые разрабатываются 3d модели, печатные узлы, на которые выпускается конструкторская документация и так далее.

Важным аспектом стабильной и эффективной работы СКБ является подбор программного обеспечения. Основными программами, используемыми при выполнении заданий и проведении научно-исследовательских работ,

являются Компас-3d [7], Altium Designer [8] и LTSpice [9]. По мере необходимости могут применяться отдельные модели из программного обеспечения Ansys [10].

Компас-3d позволяет проводить трехмерное моделирование, создавать чертежи и прочие виды конструкторской документации. Сотрудники СКБ приобрели базовые навыки использования Компас-3d на младших курсах обучения в университете, сейчас происходит расширение их знаний в области использования этого программного обеспечения. В ближайшем будущем планируется апробация проведения некоторых видов инженерных расчетов с использованием Компас-3d. Компас-3d является основным программным обеспечением для студентов из второй группы и активно применяется студентами из первой группы.

Altium Designer позволяет сотрудникам СКБ создавать проекты электрических принципиальных схем с последующей трассировкой печатных плат. Это программное обеспечение является основным для студентов первой группы, студенты второй группы имеют базовые навыки работы в нем. Необходимо отметить, что трассировка печатных плат является одним из наиболее сложных и ответственных видов работ, который выполняют сотрудники СКБ. Более того, трассировка печатных плат наиболее затратна по времени по сравнению с прочими видами работ. Это обусловлено тем, что необходимо полное понимание функционирования устройства или узла, для которого разводится печатная плата, необходимо знать правила трассировки печатных плат (выбор ширины и толщины дорожек, расположение полигонов, разводка цепей питания и земли, размещение аналоговой и цифровой части схем, размещение дорожек по слоям платы в зависимости от назначения, обеспечение теплоотвода от радиоэлементов, требования по электромагнитной совместимости и так далее). Сегодня не существует стандартных подходов к трассировке печатных плат, а сам процесс является многогранным и требует от инженера-электроника творческого подхода, умения решать нетривиальные задачи. Первая группа студентов была обучена основам трассировки печатных

плат в рамках обучающего задания. На рис. 7 представлена созданная студентами первой группы в рамках обучения печатная плата.

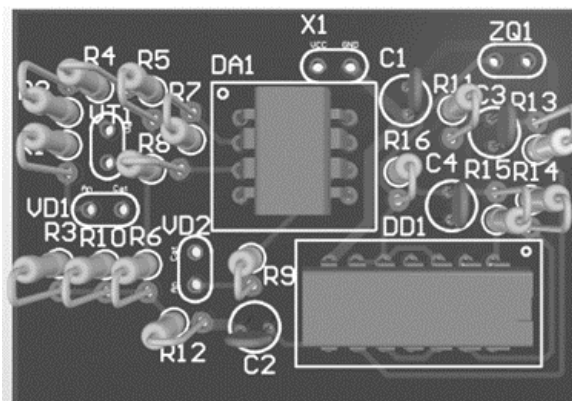


Рис. 7. Печатная плата датчика дыма

В связи с вышесказанным, было принято решение о выделении трассировки печатных плат как одной из тем научно-исследовательских работ студентов в СКБ. Будут разрабатываться новые методы и подходы к трассировке печатных плат, в перспективе будет вестись работы по созданию алгоритмов автоматической трассировки печатных плат.

С программным обеспечением LTspice ознакомлены все сотрудники СКБ. Оно используется при проведении научно-исследовательских работ при апробации работы электрических принципиальных схем. В перспективе планируется освоение программного обеспечения Multisim [11] для аналогичных целей.

Отдельные модули программного обеспечения Ansys используются при проведении инженерных расчетов. Например, отдельные модули программного обеспечения Ansys могут использоваться при расчетах прочности механических деталей, при отводе тепла за счет жидкостного охлаждения и так далее.

V. РАБОЧЕЕ ПРОСТРАНСТВО СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО

Для повышения эффективности работы СКБ было много внимания уделено организации рабочего пространства. Была организована коворкинг

зона для проведения совещаний, обучения и дистанционной работы с ответственными лицами курирующего предприятия, а также совместной работы в рамках научно-исследовательских работ. Вид коворкинг зоны представлен на рис. 8.



Рис. 8. Коворкинг зона СКБ

Благодаря наличию интерактивного оборудования в коворкинг зоне возможно проведение презентаций, обучающих занятий и обсуждений с участием нескольких человек. Удобство в применении интерактивного оборудования заключается также в том, что куратор ответственный за задание может удаленно подключиться к интерактивной зоне СКБ, демонстрировать на экране необходимые материалы или обучать использованию программного обеспечения сотрудников СКБ.

Рабочее место каждого сотрудника СКБ оборудовано письменным столом, тумбой и персональным компьютером. Типовое рабочее место сотрудника СКБ представлено на рис. 9.



Рис. 9. Типовое рабочее место сотрудника СКБ

При необходимости выполнения задач, например, по монтажу компонентов на макетную плату, сотрудники СКБ «УППО-УГАТУ» могут использовать производственные мощности ПИШ «Моторы Будущего». Необходимо отметить, что сотрудники производства ПИШ «Моторы Будущего» обучают и оказывают консультационную поддержку при выполнении производственных операций сотрудниками СКБ.

Расстановка столов в аудитории СКБ выполнена по 4 штуки, как показано на рис. 10.

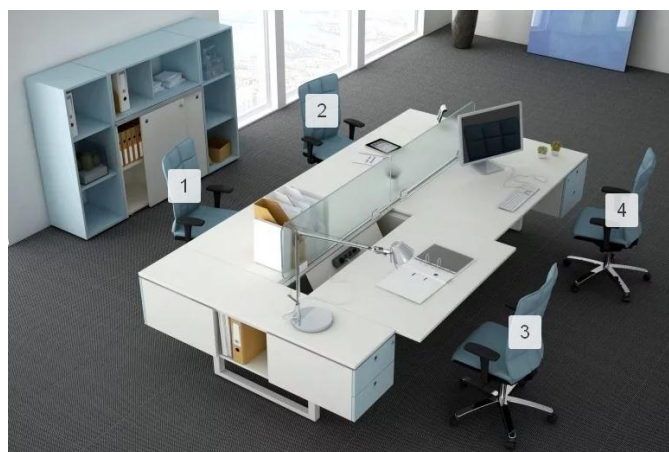


Рис. 10. Расстановка столов в аудитории СКБ

Лицом в одну сторону сидят сотрудники, находящиеся в одной группе. Таким образом, при общих заданиях или при схожести выполняемых заданий

им проще и быстрее общаться друг с другом. Например, на местах 1 и 2 сидят студенты из первой группы, на местах 3 и 4 – студенты из второй группы.

VI. ПЛАНЫ ПО РАЗВИТИЮ СТУДЕНЧЕСКОГО КОНСТРУКТОРСКОГО БЮРО

На сегодняшний день установочный период работы СКБ подходит к концу, студенты обеспечены темами для проведения научно-исследовательских работ и выполняют задания курирующего предприятия. По достижению момента устойчивой работы планируется развитие СКБ.

Во-первых, планируется увеличение численности сотрудников СКБ «УППО-УГАТУ». За счет этого в ближайшие два года СКБ сможет обеспечить большую потребность в кадрах курирующего предприятия и выполнять большее количество заданий. При этом отсутствует риск неравномерной загрузки студентов, так как при отсутствии задач курирующего предприятия сотрудники СКБ могут быть отведены на выполнение аналогичных заданий от ПИШ «Моторы Будущего».

Во-вторых, составлена программа и начинается самообучение сотрудников СКБ. На сегодняшний день сотрудники СКБ обладают необходимым набором знаний и умений для выполнения заданий курирующего предприятия. Однако, для повышения скорости и качества выполнения заданий от сотрудников требуется постоянное самосовершенствование. В связи с этим в установленные сроки они изучают литературу по теме своей работы, смотрят обучающие интернет-ресурсы и так далее. Руководитель СКБ при этом будет проводить регулярный контроль результатов самообучения на основании согласованной программы, с которой сотрудники ознакомлены.

В-третьих, будет завершено формирование корпоративного стиля СКБ. Корпоративный стиль способствует командообразованию, сплачивает коллектив.

В-четвертых, сотрудники СКБ будут направляться на регулярные стажировки и практики. Прохождение практик целесообразно на курирующем

предприятия, так как при этом сотрудники СКБ будут лучше понимать его структуру и принципы функционирования. Для стажировок целесообразно выбирать ВУЗы Российской Федерации, ведущие производственные предприятия Российской Федерации для расширения знаний в предметной области.

В-пятых, в течение будущего года будет совершен переход на использование отечественного программного обеспечения. Для составления карт технологических процессов планируется использование программного обеспечения Вертикаль. Для трассировки печатных плат и подготовки части конструкторской документации на них планируется применение программного обеспечения Delta Design [12]. Также планируется научиться проводить инженерные расчеты с их дальнейшей верификацией в Компас 3d (анализ течения жидкости и газа, анализ теплопроводности и естественной конвекции, экспресс-анализ прочности).

Перечисленные меры повысят полезный эффект от деятельности СКБ и повысят его значимость в пределах курирующего предприятия.

VII. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящей работе была рассмотрена подготовка кадров для предприятий-разработчиков и предприятий по серийному производству электрооборудования на базе СКБ. Были рассмотрены вопросы отбора, адаптации и обучения сотрудников СКБ, описана организация работы в СКБ, формирование удобного рабочего пространства СКБ и перспективы развития СКБ. Результаты создания и начала работы СКБ «УППО-УГАТУ» показали, что подготовка кадров для предприятий-разработчиков и предприятий по серийному производству электрооборудования на базе СКБ эффективна и имеет положительный эффект в виде решения части задач курирующего предприятия. Отличительной особенностью описанного процесса подготовки кадров является стабильность, так как набор на вакантные места в СКБ может проводиться регулярно. При этом количество желающих трудоустроиться в

СКБ и в дальнейшем на курирующее предприятие сегодня превышает количество вакантных мест. По окончании ВУЗа с учетом опыта работы в СКБ на курирующее предприятие приходят сотрудники с достаточным объемом знаний, широким спектром навыков и умений. Их квалификация в полной мере соответствует ожиданиям курирующего предприятия. Необходимо отметить, что для сотрудников СКБ отсутствует необходимость в адаптации на курирующем предприятии, что минимизирует финансовые и временные затраты на данных сотрудников. Модель СКБ, привязанная к конкретному предприятию-разработчику или предприятию по серийному производству, имеет преимущество перед моделью СКБ, нацеленного на научно-техническое творчество, в виде более жестко поставленных целей. Сотрудники такого СКБ гарантированно способны выполнять поставленные задачи, при этом спектр задач ограничивается тематической направленностью СКБ. Более того, сотрудники СКБ способны не только к выполнению типовых задач по своей специальности, но и к решению новых ответственных задач, в том числе в области разработки новых изделий.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Разрыв между образованием и профессиональными компетенциями, безусловно, существует Шохин А. Н. [Электронный ресурс] URL: <https://russiancouncil.ru/analytics-and-comments/comments/razryv-mezhdu-obrazovaniem-i-professionalnymi-kompetentsiyam/> (Дата обращения: 30.11.2022)
2. Профессиональные стандарты [Электронный ресурс] URL: <https://profstandart.rosmintrud.ru/> (Дата обращения: 30.11.2022)
3. Наука и университеты. Национальный проект «Наука» [Электронный ресурс] URL: <https://национальныепроекты.рф/projects/nauka-i-universitety> (Дата обращения: 30.11.2022)
4. Передовые инженерные школы [Электронный ресурс] URL: <https://analytics.engineers2030.ru/> (Дата обращения: 30.11.2022)
5. Методические рекомендации для преподавателей по разработке тестов для контроля знаний студентов и качества обучения [Электронный ресурс] URL: <https://fk.masu.edu.ru/sveden/doc/metodicheskie/mr-po-razrabotke-testov-dlya-kontrolya-znaniy-studentov-i-kachestva-obucheniya.pdf> (Дата обращения: 01.12.2022)
6. Секу К. Адаптация нового персонала на предприятии //Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2015. – №. 105. – С. 210-225.
7. Компас-3d [Электронный ресурс] URL: <https://ascon.ru/products/7/review/> (Дата обращения: 01.12.2022)
8. Altium Designer [Электронный ресурс] URL: <https://www.altium.com/ru/altium-designer/> (Дата обращения: 01.12.2022)

9. Володин В. Я. LTspice: компьютерное моделирование электронных схем. – БХВ-Петербург, 2010.
10. Ansys [Электронный ресурс] URL: <https://www.ansys.com/> (Дата обращения: 01.12.2022)
11. Multisim [Электронный ресурс] URL: <https://www.ni.com/ru-ru/support/downloads/software-products/download.multisim.html#452133> (Дата обращения: 02.12.2022)
12. САПР Delta Design [Электронный ресурс] URL: <https://www.eremex.ru/products/delta-design/> (Дата обращения: 02.12.2022)

Вавилов В. Е., Ямалов И. И., Шарафутдинов Ш. Н., Глумов Д. А., Ильясов Д. Р., Мустафин Д. Д.

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ИМИТАЦИОННОЙ МОДЕЛИ АКТИВНОГО МАГНИТНОГО ПОДВЕСА

Аннотация: В данной работе исследован активный магнитный подвес и его составные части на примере модели, составленной в пакете MATLAB. Рассмотрена конструкция активного магнитного подшипника (АМП). Представлены схемы управления системой и составными элементами АМП.

Ключевые слова: активный магнитный подшипник, система управления АМП, магнитный подвес, магнитная левитация.

Система активного магнитного подшипника работает благодаря магнитной левитации. Магнитная левитация — это метод, с помощью которого объект подвешивается без какой-либо поддержки, кроме магнитных полей. Магнитная сила используется для противодействия воздействию гравитационной силы и любых других сил.

Моделирование динамических явлений в роторных системах и промышленных машинах предполагает использование различных подходов и инструментов проектирования. Качественный анализ динамики роторов требует полного учета всех взаимосвязанных процессов, в том числе нелинейных. Применительно к промышленным машинам энергетического машиностроения такие процессы включают механические, электрические, магнитные, тепловые и другие явления.

Одним из наиболее современных типов подшипников ротора являются магнитные, в частности активные магнитные подшипники. Они имеют стабилизацию ротора в центральном положении с помощью управляемых

электромагнитных полей. Эти поля создаются путем генерации исполнительных сигналов системой управления и подачи соответствующих токов или напряжений на обмотки электромагнитов АМП. С точки зрения типа системы управления, эти управляющие сигналы могут зависеть от положения опорной секции ротора в пространстве, их скоростей и мгновенных токов в обмотках электромагнита.

Модель активного магнитного подвеса

Анализ динамики ротора требует знания их параметров. Во-первых, это масса, жесткость и демпфирующие характеристики роторов, которые зависят от конфигурации валопровода и установленных элементов, свойств их материалов и параметров дополнительных элементов. Во-вторых, это упругодемпфирующие параметры ротора.

Активные магнитные подшипники используются в различных системах малых, средних и больших роторов. Среди промышленных машин это, например, двигатели среднего размера, электрические машины, центрифуги, большие насосы, очень большие турбогенераторные установки и т.д. Основная проблема при анализе динамики роторов таких машин заключается в том, чтобы учитывать, как структуру отдельных элементов конструкции, так и их компоновку, а также процессы различной физической природы.

Конструктивно активный магнитный подшипник состоит из следующих частей, представленных на рис. 1:

- электромеханической части (подшипник);
- электронной системы управления.

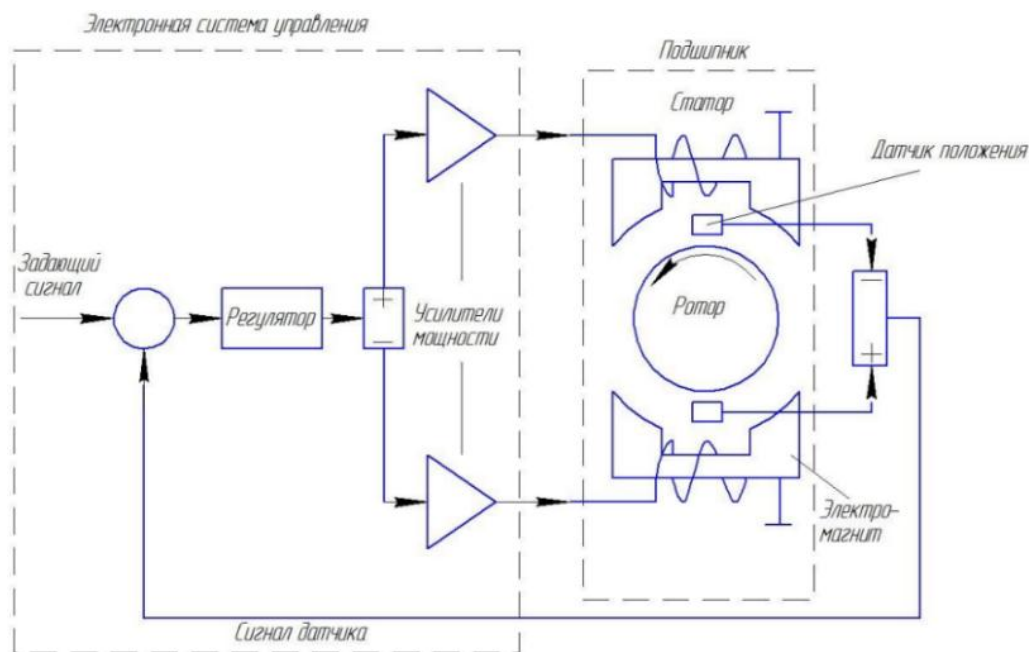


Рис. 1. Схема системы регулирования активного магнитного подшипника

Подшипник состоит из подвешенного в магнитном поле ротора, электромагнитов, закрепленных на статоре, а также датчиков положения ротора. Механический контакт между статором и ротором отсутствует.

Датчики положения фиксируют смещения ротора из заданного положения равновесия. Сигнал с датчиков положения поступает на электронную систему управления, где происходит его обработка. Обработка происходит таким образом, что электромагнитные силы возвращают ротор в заданное положение.

Также в конструкции предусмотрены так называемые страховочные подшипники. Они служат в качестве опоры ротора в случаях, когда подвес отключен или же в аварийных случаях. Страховочные подшипники устанавливаются с зазором, следовательно при включенном подвесе они не вращаются.

Электронная система управления состоит из следующих основных элементов:

- регулятор;
- усилитель мощности.

При обработке сигналов, поступающих с датчиков положения, электронная система управляет положением ротора. Управление происходит за счет изменения токов в электромагнитах. Благодаря выбору режимов управления токов можно обеспечить устойчивое положение ротора. Помимо этого, электронная система управления позволяет достичь оптимальные значения жесткости подвеса и демпфирования.

Электронная система управления представляет собой электронный блок, соединенный с помощью кабелей с подшипниками, а также с источниками питания.

На рис. 2 представлена модель системы управления активным магнитным подвесом. Составленная система магнитного подвеса состоит из синхронного двигателя с постоянными магнитами, статора, двух радиальных подшипников с медной обмоткой, осевого подшипника и вала. Помимо конструктивных элементов для управления используются следующие блоки: блок Step, блоки Scope, подсистемы для управления приводом СДПМ, блоков Form.

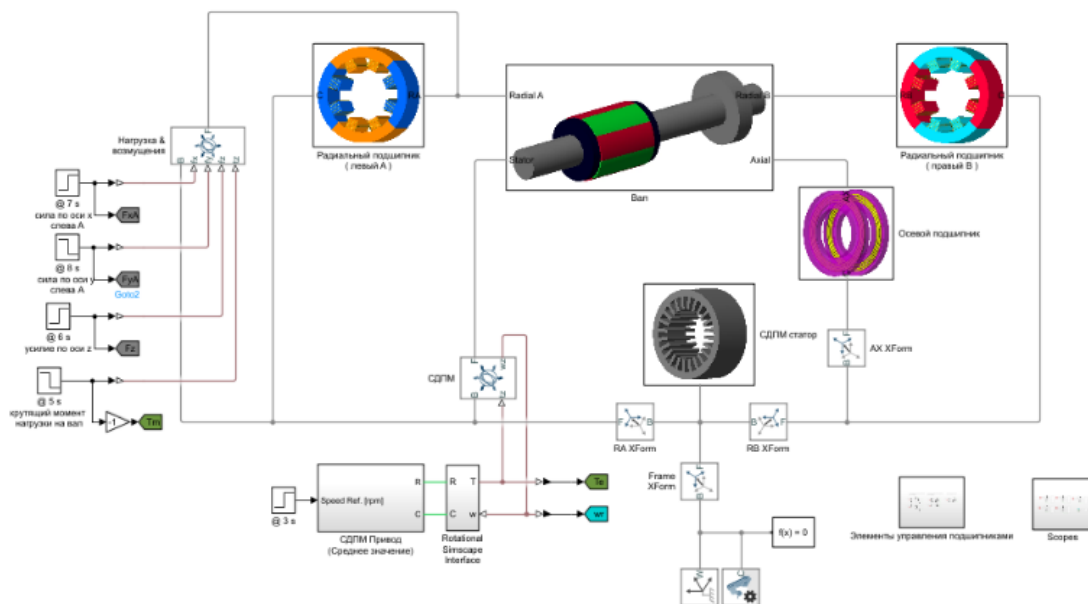


Рис. 2. Общий вид модели

Изначально, система находится в покое и удерживается ротором (СДПМ). Управление осуществляется ПИ-контроллером при помощи идеального датчика вращательного движения, схема которого представлена на рис. 3. Датчик

идеален, поскольку он не учитывает инерцию, трение, потребление энергии и так далее.

Порты сигналов ω и α сообщают угловую скорость и угол соответственно, порта R относительно порта C. Измеренная угловая скорость положительна, когда угловая скорость в порту R больше, чем угловая скорость в порту C.

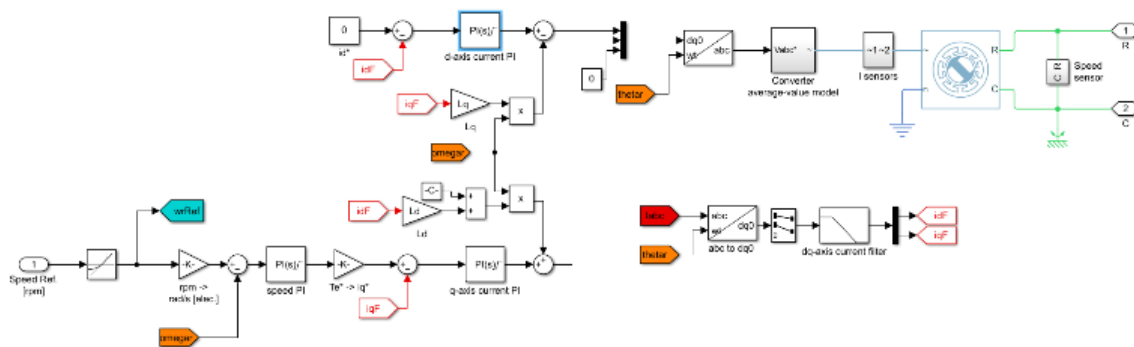


Рис. 3. Схема управления СДПМ

Вал в данной системе выполняет функцию несущей конструкции и ферромагнитного сердечника. Однако его основной функцией является передача вращающего момента. Рис. 4 отражает структурную схему вала.

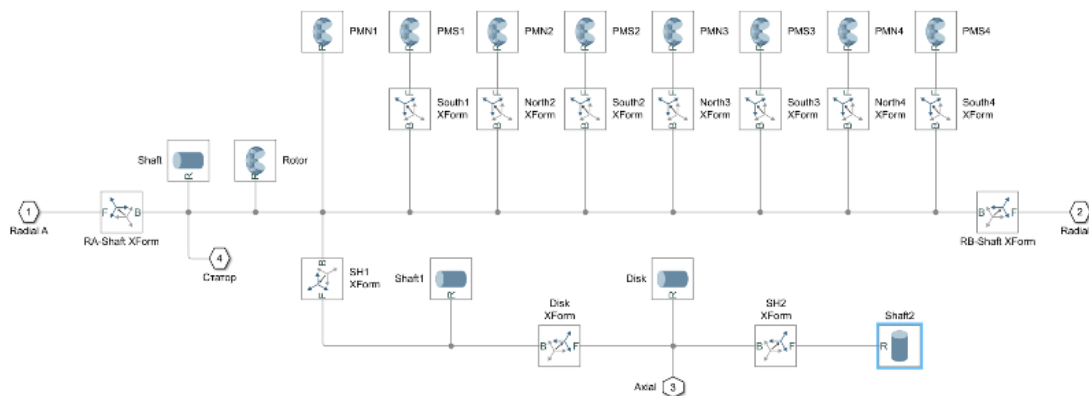


Рис. 4. Схема вала

Радиальные подшипники находятся по левую и правую стороны от ротора и выполняют функцию удержания системы по осям X и Y. На рис. 5 и 6 отражены схемы левого и правого радиальных подшипников соответственно. Управление положением радиальных подшипников выполняется при помощи ПИД-контроллеров. В системе используется идеальный датчик силы, то есть устройство, которое преобразует переменную, проходящую через датчик,

в управляющий сигнал, пропорциональный силе с заданным коэффициентом пропорциональности. Датчик идеален, поскольку он не учитывает инерцию, трение, задержки, потребление энергии и так далее.

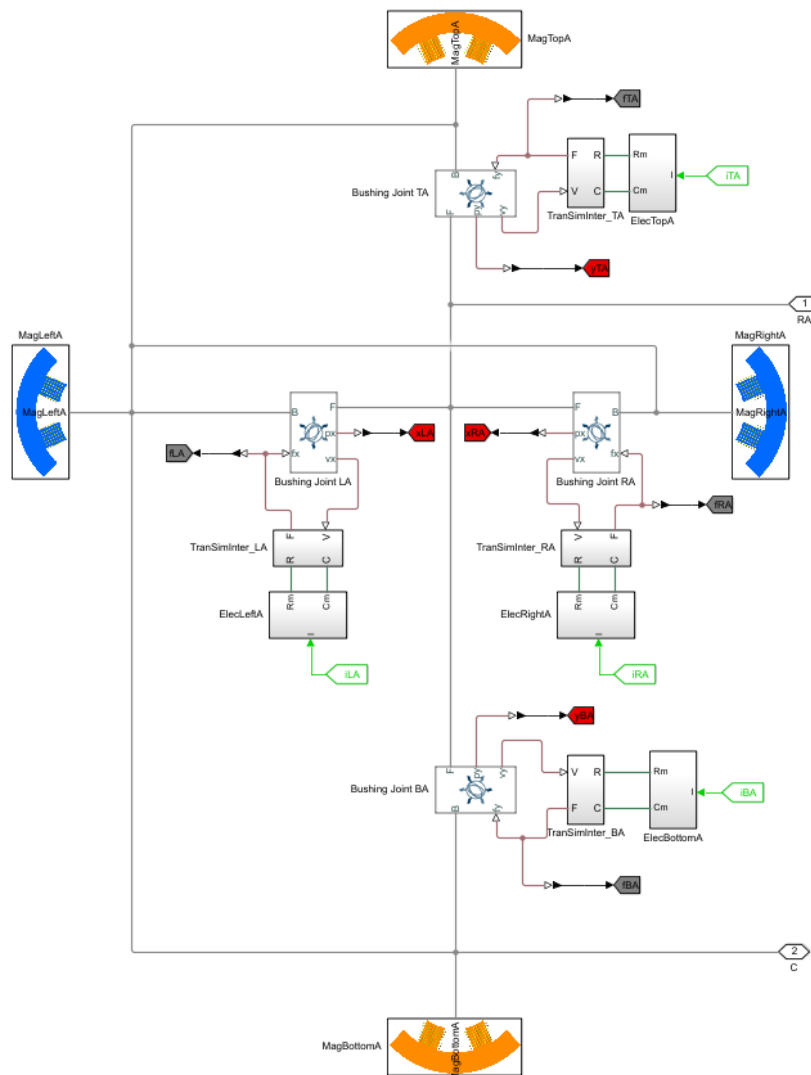


Рис. 5. Левый радиальный подшипник

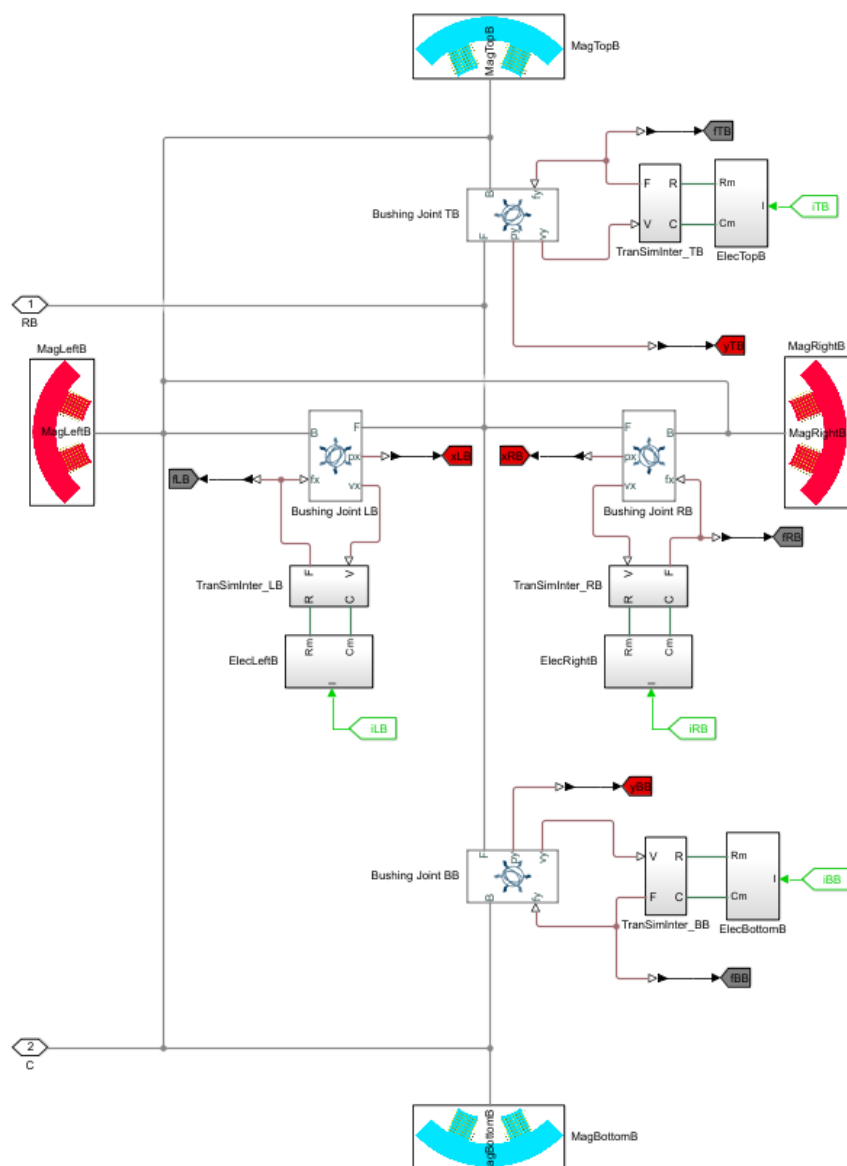


Рис. 6. Правый радиальный подшипник

На рис. 7 приведен осевой магнитный подшипник, который находится на краю вала и обеспечивает стабильность системы по оси Z. Как и радиальные подшипники управляется при помощи ПИД-контроллера и датчиков силы.

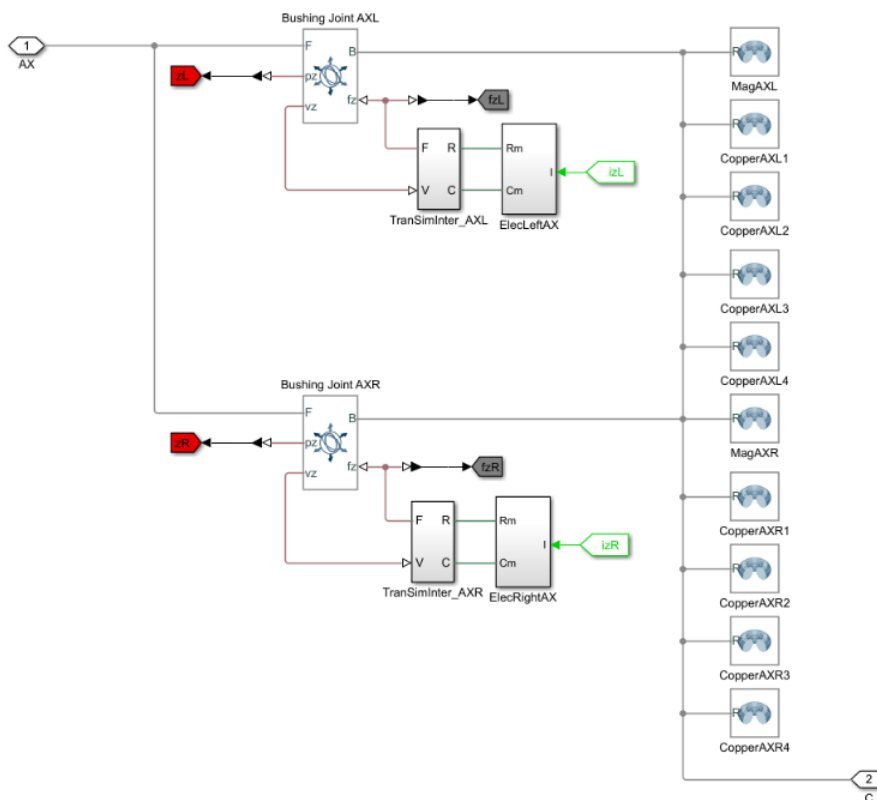


Рис. 7. Осевой подшипник

Как в радиальном, так и в осевом подшипнике для поддержания воздушного зазора используется специальное магнито-удерживающее устройство, основанное на магнитной силе сопротивления:

$$F = \frac{-\Phi^2}{\mu_0 \cdot A \cdot \cos\theta} \quad (1)$$

где Φ – поток в магнитной цепи;

μ_0 – проницаемость вакуума;

A – площадь поперечного сечения;

θ – угол каждого полюса относительно центральной линии между полюсами.

Создаваемая магнитная сила действует для закрытия воздушного зазора.

На рис. 8 проиллюстрирована 3D-модель активного магнитного подвеса

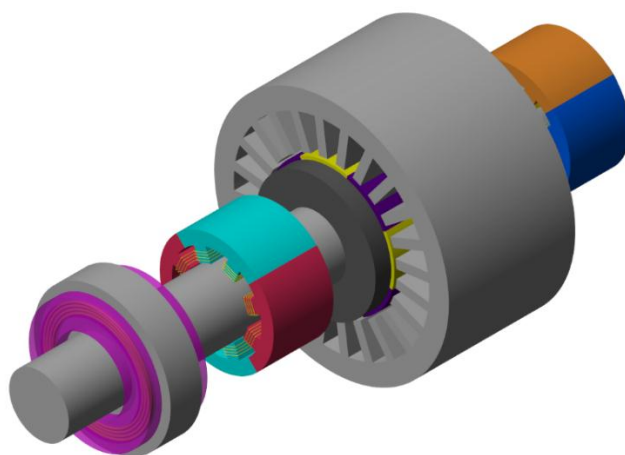


Рис. 8. 3D-модель АМП

Помимо функции управления приводимая модель активного подшипника позволяет изменять физические свойства её компонентов. На рис. 9 и 10 отражены диалоговые окна свойств, в которых задаётся плотность, масса и размеры выбранных объектов.

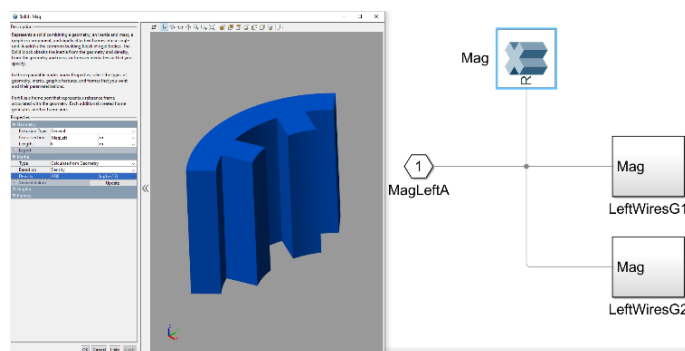


Рис. 9. Задание свойств электромагнита

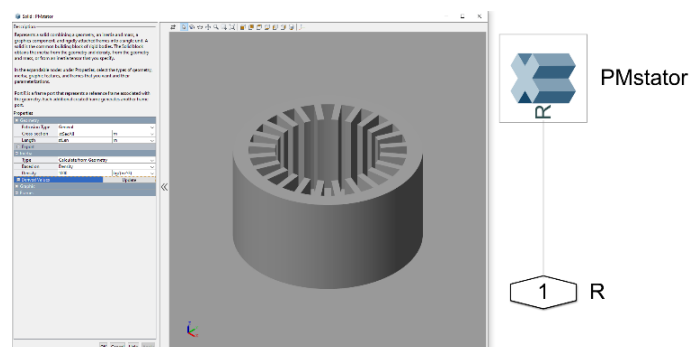


Рис. 10. Задание свойств СДПМ статора

Используется электромагнитный конвертер, обеспечивающий общую границу между электрической и магнитной областями. Если ток и напряжение

через электрические порты и поперек них равны I и U , а поток и магнитодвижущая сила (МДС) через магнитные порты и поперек них равны Φ и F_m , то:

$$F_m = N \cdot I \quad (2)$$

$$U = - \frac{N \cdot d\Phi}{dT} \quad (3)$$

где N – количество витков электрической обмотки.

Представленные уравнения представляют собой преобразование электромагнитной энергии без потерь.

Если ток от электрических портов $+$ к $-$ положительный, то результирующая МДС положительная, действующая через магнитные порты N к S. Положительная скорость изменения потока, протекающего от N к S, приводит к отрицательному наведенному напряжению на портах $+$ и $-$.

Данная модель системы активного магнитного подвеса позволяет получить осциллограммы, изображенные на рис. 11–14. Они отражают текущий воздушный зазор, нагрузку на систему, управляющий ток на радиальных подшипниках по осям X и Y.

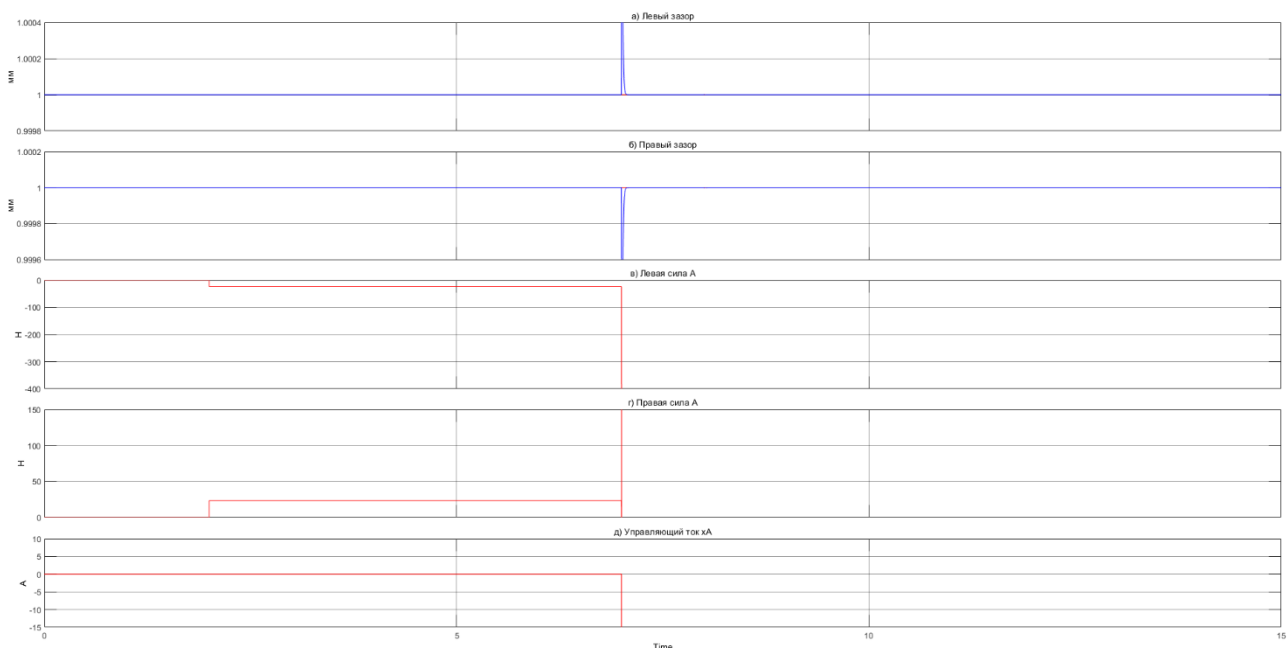
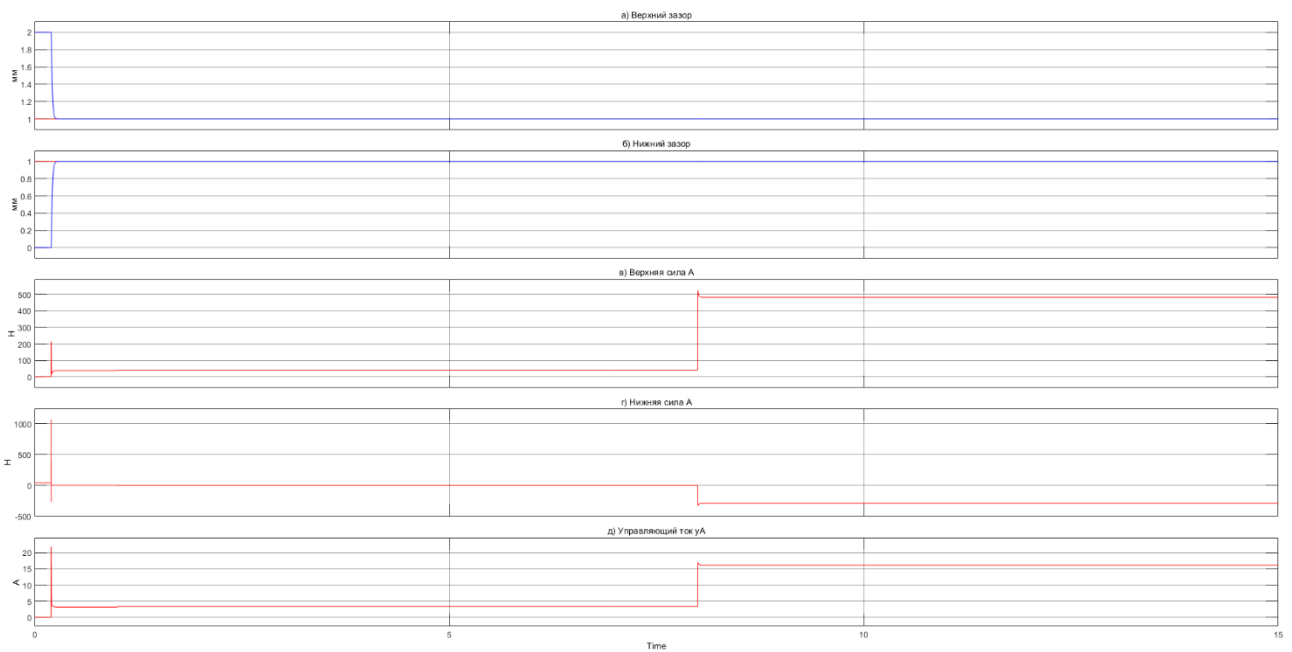
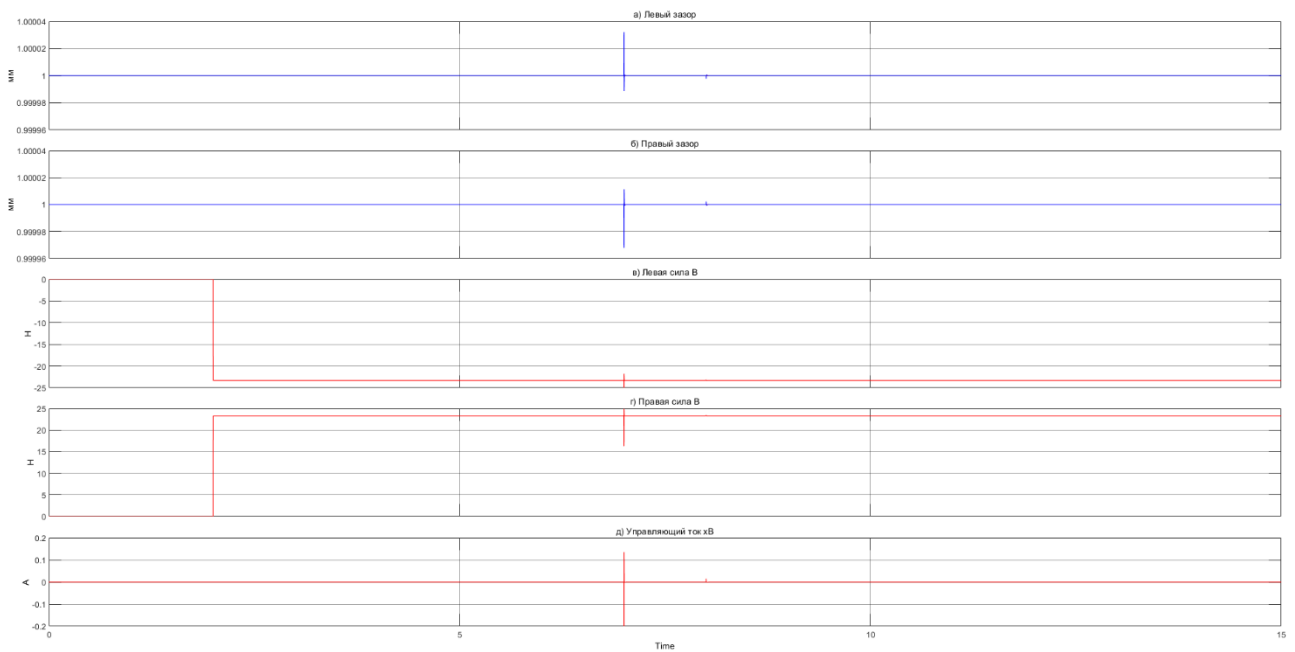


Рис. 11. Осциллограммы А x-axis:

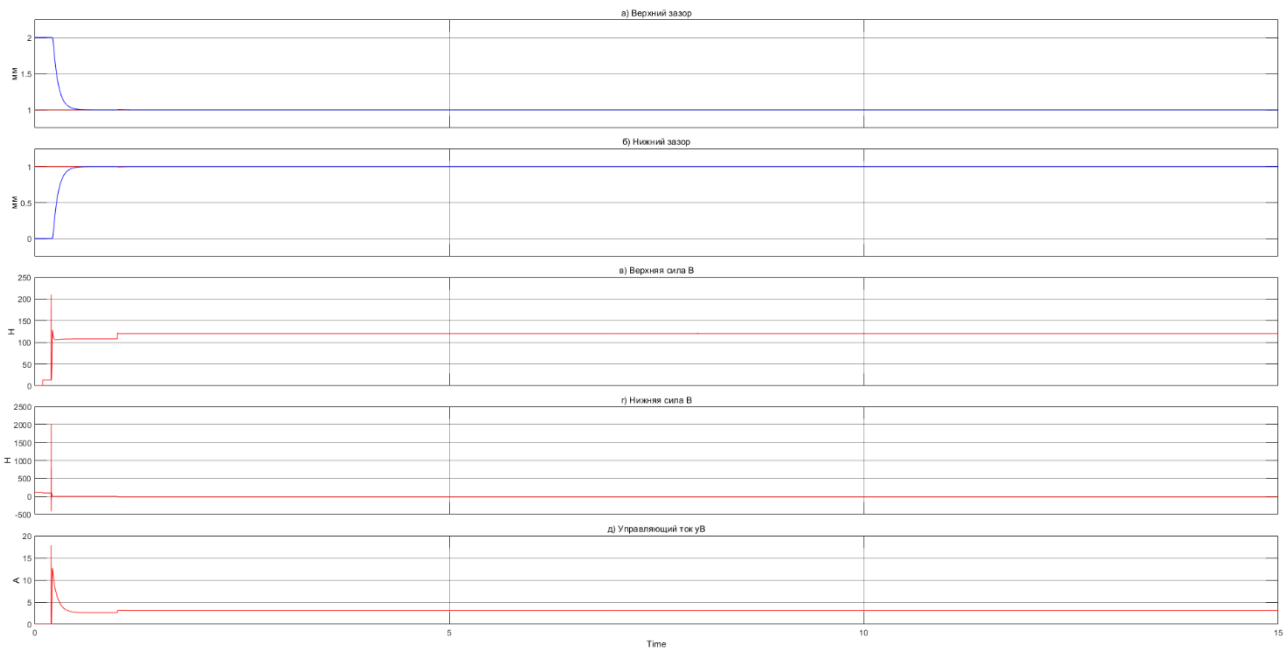
a – левый зазор; b – правый зазор; c – левая сила А; d – правая сила А;
 e – управляющий ток xA



*Рис. 12. Осциллограммы А у-axis:
 а – верхний зазор; б – нижний зазор; в – верхняя сила А; г – нижняя сила А;
 д – управляющий ток uA*

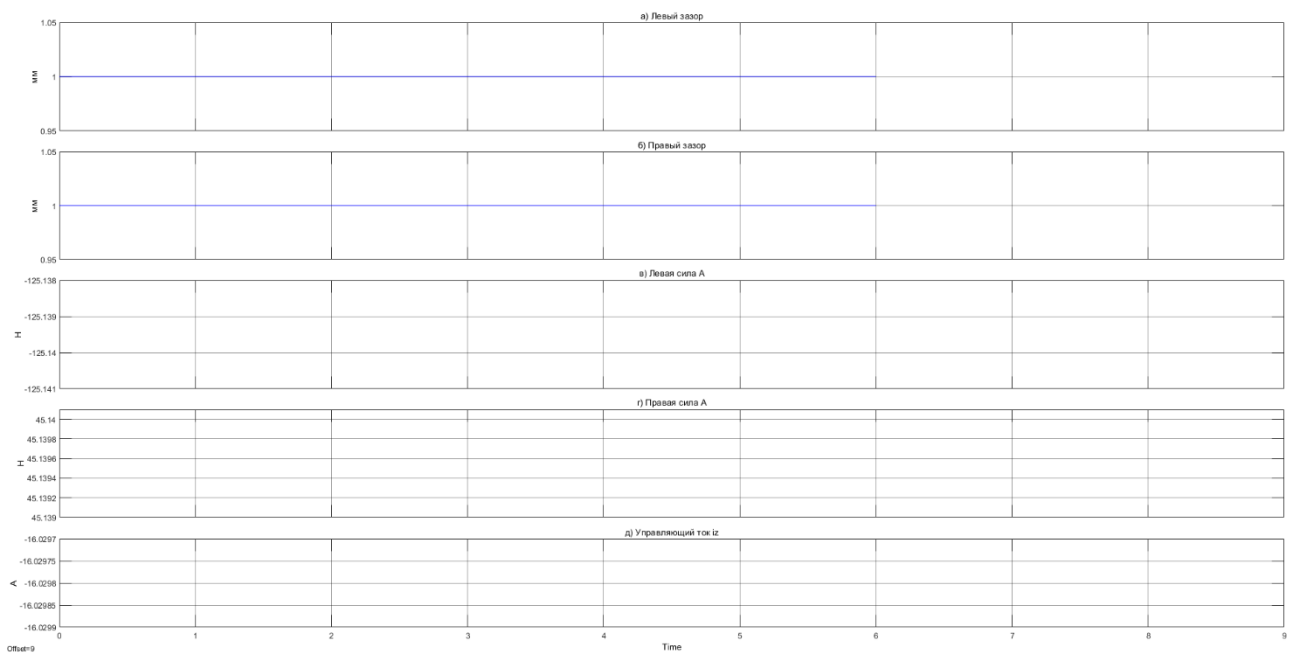


*Рис. 13. Осциллограммы В х-axis:
 а – левый зазор; б – правый зазор; в – левая сила В; г – правая сила В;
 д – управляющий ток xB*



*Рис. 14. Осциллограммы В у-axis:
 а – верхний зазор; б – нижний зазор; в – верхняя сила В; г – нижняя сила В;
 д – управляющий ток u_B*

На рис. 15 представлены осциллограммы для осевого подшипника. Как и для радиальных здесь представлены зависимости воздушных зазоров, приложенной на систему силы и тока управления от времени.



*Рис. 15. Осциллограммы z-axis осевого подшипника:
 а – левый зазор; б – правый зазор; в – левая сила А; г – правая сила А;
 д – управляющий ток i_z*

На рис. 16 изображен график, демонстрирующий число оборотов, электромагнитный и нагрузочный крутящий момент ротора СДПМ. В момент, когда систему оказывается сила 400 Н возникает электромагнитный момент, так как в этот момент система пытается вернуть равновесие.

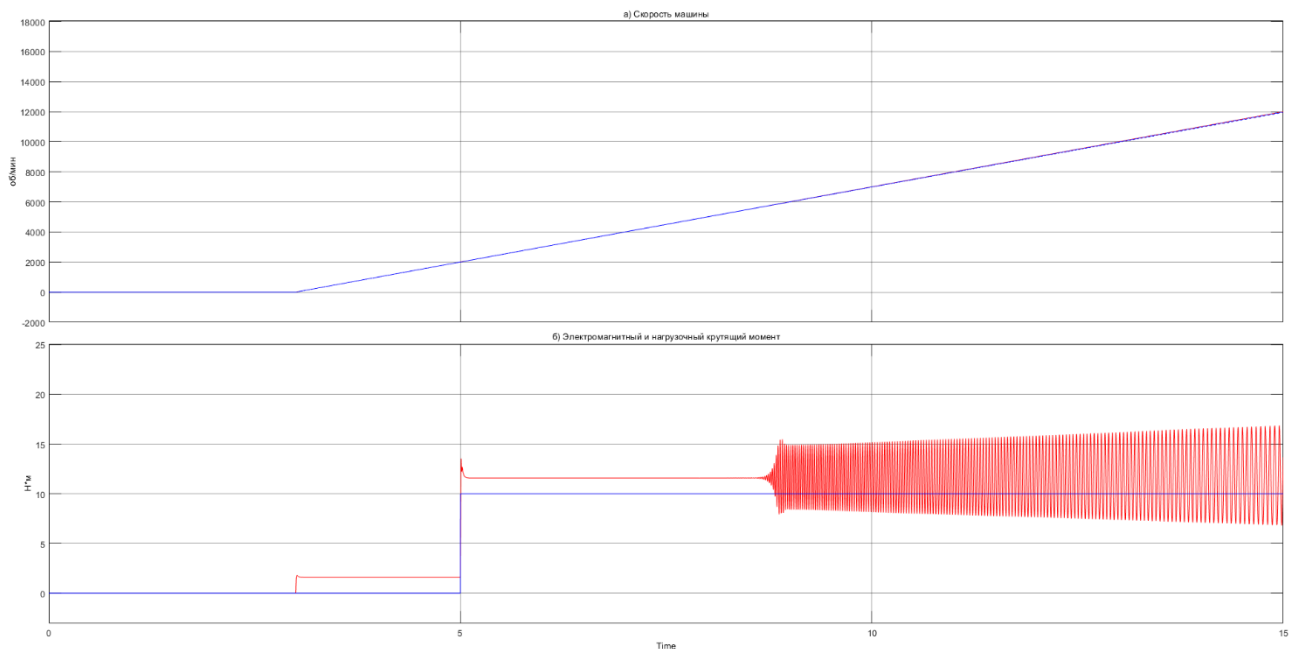
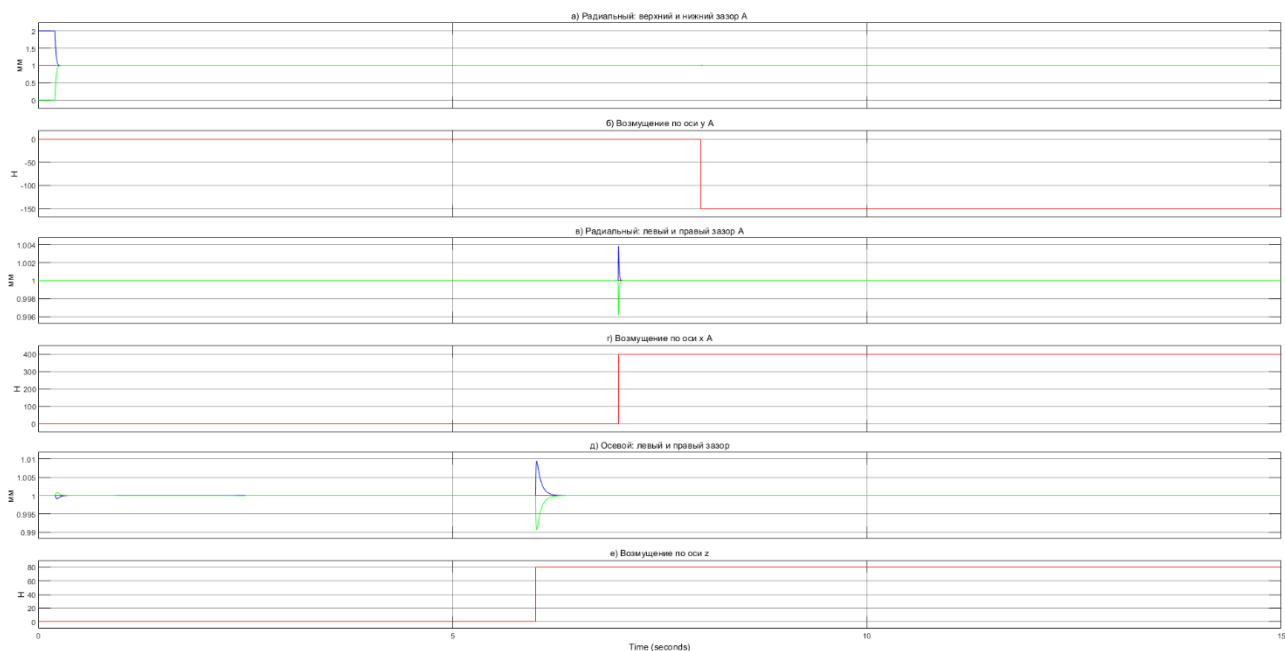


Рис. 16. Осциллограммы СДПМ:

А – скорость машины; б – электромагнитный и нагрузочный крутящий момент

На рис. 17 представлены осциллограммы боковых отклонений и отклонений по осям XYZ всех задействованных в данной системе подшипников.



*Рис. 17. Осциллограммы подшипников:
 а – радиальный: верхний и нижний зазор А; б – возмущение по оси у А;
 в – радиальный: левый и правый зазор А; г – возмущение по оси х А; д – осевой: левый
 и правый зазор; е – возмущение по оси z*

Согласно полученным графикам, система всегда находится в равновесии. В момент приложения сил система стремится вернуться в равновесное состояние силами магнитного притяжения, действующими на тело со стороны управляемых электромагнитов.

Заключение

Активные магнитные подшипники используются для левитации вращающегося вала и обеспечивают относительное движение без физического контакта. Составленная модель демонстрирует комплексную (механическую, электрическую и магнитную) физическую систему, которая включает в себя систему привода синхронной машины с постоянными магнитами, две системы радиальных подшипников на обоих концах вала и систему осевых подшипников. Эта модель иллюстрирует общие принципы работы активных магнитных подшипников.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kimman M. H., Langen H. H., Munnig Schmidt R. H. A miniature milling spindle with active magnetic bearings // *Mechatronics*. 2010. Vol. 20, № 2. P. 224–235.
1. C. Wei, "Controller Design and Optimization for Rotor System Supported by Active Magnetic Bearings," Ph.D. dissertation, Univ. Duisburg-Essen, Feb. 11, 2015.
2. Simscape Electrical Documentation – MathWorks. [Online]. Available: <https://ww2.mathworks.cn/help/sps/ref/>
3. Активные электромагнитные подшипники для крупных энергетических машин. М.: ВНИИЭМ, 1988. 10 с.
4. Журавлев Ю. Н. Активные магнитные подшипники: теория, расчет, применение. СПб.: Политехника, 2003. 206 с
5. Герман-Галкин С. Г. Matlab&Simulink. Проектирование мехатронных систем на ПК. СПб.: КОРОНА-Век, 2008. 368 с.