

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 4

Материалы
XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции
(г. Уфа, 25 – 29 ноября 2024 г.)

**МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РФ
УФИМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ НАУКИ И ТЕХНОЛОГИЙ**

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 4

*Материалы
XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции*

(г. Уфа, 25 – 29 ноября 2024 г.)

Научное электронное издание сетевого доступа

**Уфа
РИЦ УУНиТ
2024**

УДК 621.3.01
ББК 31.21
М12

*Печатается по решению заседания кафедры электромеханики
ПИШ «Моторы будущего» УУНиТ.
Протокол № 3 от 29.11.2024 г.*

Редакционная коллегия:

д-р техн. наук, профессор **Ф.Р. Исмагилов** (*отв. редактор*);
д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электромеханики;
директор ПИШ «Моторы будущего» **В.Е. Вавилов**;
канд. техн. наук, доцент **М.В. Охотников**;
канд. техн. наук, доцент **И.И. Ямалов**;
инженер ПИШ «Моторы будущего» **Ш.Н. Шарафутдинов**

Мавлютовские чтения: материалы XVIII Всероссийской молодежной науч-
М12 ной конференции (г. Уфа, 25 – 29 ноября 2024 г.) / отв. ред. Ф.Р. Исмагилов /
в 9 т. Т. 4. [Электронный ресурс] / Уфимск. ун-т науки и технологий. – Уфа:
РИЦ УУНиТ, 2024. – 97 с. – URL: <https://uust.ru/digital-publications/2024/280.pdf>
– Загл. с титула экрана.

ISBN 978-5-7477-6015-8

Том 4: ISBN 978-5-7477-6030-1

В 4-й том сборника материалов конференции вошли статьи секции 4.
Сборник предназначен для студентов, аспирантов, молодых ученых и
преподавателей.

Все материалы представлены в авторской редакции.

ISBN 978-5-7477-6030-1 (том 4)
ISBN 978-5-7477-6015-8

УДК 621.3.01
ББК 31.21
© УУНиТ, 2024

СЕКЦИЯ 4. ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ

УДК 62

В.Р. АЛЮШЕВ

Alyushev02@mail.ru

Науч. руковод. – **И.А. КУНСБАЕВ**

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ БЕСПИЛОТНЫХ ПОДВОДНЫХ АППАРАТОВ В СОВРЕМЕННОМ МИРЕ

Аннотация: технологии в современном мире не стоят на месте, беспилотные летательные аппараты БПЛА уже не для кого не являются чем-то удивительным, на базе этого разрабатываются подводные беспилотные аппараты ПБА. В данной статье представлен обзор сфер применения ПБА.

Ключевые слова: беспилотные аппараты, исследования, подводный мир, судна, Арктика, подводные дроны.

Введение

В современном мире технологии не стоят на месте и с каждым днем появляются новые изобретения, которые способны изменить и облегчить нашу жизнь. Сейчас каждый человек слышал об беспилотных летательных аппаратах, но вместе с ними разрабатываются подводные беспилотные аппараты. Но из-за того, что эти аппараты должны находится под водой, процесс их разработки довольно тяжелый и долгий.

Несмотря на всю сложность конструкции и технологии, подводные беспилотные аппараты внесли значительную роль в современный мир. Благодаря такому рода изобретения у человека появляется возможность исследовать океаны или реки, без собственного погружения под воду, что способствует безопасности и доступности для каждого человека.

В процессе эксплуатации беспилотных аппаратов может осуществляться сбор и анализ данных водоемов, изучение новых подводных местностей, могут проводиться различные поиски под водой, а также военные стратегические операции.

Беспилотный подводный аппарат в условиях Арктики

Подводный мир в Арктике очень интересен ученым. Но добраться до туда это тяжелая задача, с которой лично сам человек может не справиться, для этих целей хорошо подойдут беспилотные подводные аппараты. С помощью них появляется возможность изучения рыб и других подводных обитателей Арктики. Также это полезно в отслеживании общей экологической обстановки.

Причины использования беспилотных подводных аппаратов в Арктики:

1. Сделать жизнь человека более безопасной, так как ему не нужно лезть в воду, что исключает опасность для него.

2. В случае непредвиденной ситуации сам аппарат можно заменить.

3. Возможность применения нескольких дронов для решения одной задачи (технология «Стаи»).

Примером данного типа ПБА может быть, «Витязь-Д» (рис. 1) – российский автономный необитаемый подводный аппарат. Данный аппарат имеет массу 5650 кг, способный выдерживать давление до 1000 атмосфер. Он отлично подходит под условия Арктики и ее исследования.



Рис. 1. Витязь-Д

Беспилотный подводный аппарат для осмотра подводной части корпуса судна

Корабли играют не малую роль в современном мире. И за ними должен быть надлежащий осмотр, так как любой недочет может повлечь гибель людей. Морские суда могут повредить свой корпус в случаях задевания какого-либо объекта под водой или при посадке на мель. Это может происходить из-за ненадлежащего наблюдения за подводной обстановкой, неточного указания глубин или при превышении скорости морского судна.

При любой ситуации способной привести к повреждению корпуса судна, немедленно проводится внеплановый осмотр. Для этого корабль загоняют в сухой док, либо же с помощью водолазов осматривают судно на плаву. В случаях таких происшествий, капитан обязан своевременно доложить об этом, и обеспечить проверку судна водолазами.

Для таких целей, чтобы не прибегать к помощи водолазов, возможно применение беспилотных подводных аппаратов, оснащенных камерами, одним из таких примеров может быть дрон Вікі (рис. 2).

Дрон Вікі не имеет традиционных винтов, он передвигается под водой с помощью хвоста, как обычная рыба. Он управляется дистанционно человеком, а благодаря камере, расположенной в самом дроне, человек способен видеть все происходящее под водой. Таким образом, чтобы осмотреть подводную часть корпуса судна, человеку не придется надевать водолазный костюм, ему всего лишь нужно запустить в воду беспилотный подводный аппарат.



Рис. 2. Дрон Wiki

Беспилотный подводный аппарат для исследования подводного мира

Подводный мир для человека по сей день является загадкой, которую он очень хочет разгадать, но для этого нужны огромные усилия. По этой причине дроны стали ключевым инструментом для морских исследований. Их возможности превышают человеческие, эти аппараты снабжают камерами, что полностью исключает погружение человека в воду. А также людей волнует вопрос об загрязнении мирового океана. Благодаря беспилотным подводным аппаратам эти вопросы для человека становятся все больше решаемые. С помощью них можно оценить уровень загрязнения рек или водоемов, а также есть возможность нахождения и устранения разливов нефти в морях, таким образом человек способен добраться до тех мест, в которых он физически не мог побывать. Для таких целей можно применять дрон Gladius (рис. 3).



Рис. 3. Gladius

Gladius имеет четыре независимых электродвигателя, наделяющих его высокой подвижностью и маневренностью. Данный дрон использует подводный кабель до 100м с помощью которого осуществляется управление. А также для удобства и мобильности есть возможность управлять аппаратом со смартфона, если управлять необходимо в удаленных местах.

Заключение

В настоящей статье проведен обзор различных сфер применения подводных беспилотных аппаратов. Также приведены примеры подводных дронов, применяющихся в разных условиях, и их характеристики. Подводные беспилотные аппараты очень полезны для современного мира, есть много задач, с которыми они справляются лучше, чем человек, ведь самое главное, что они значительно упрощают жизнь человека, а также делают ее более безопасной, так как они заменяют действия человека.

Библиографический список

1. Применение беспилотных подводных и надводных аппаратов в условиях Арктики Аведян А.С., Колбина О.Н. [электронный ресурс]. – Режим доступа: https://www.elibrary.ru/download/elibrary_50146406_23795754.pdf

2. Обоснование возможности использования беспилотного аппарата (дрона) для осмотра подводной части корпуса судна Белоус В.А., Ермаков С.В. [электронный ресурс]. – Режим доступа:

https://www.elibrary.ru/download/elibrary_41156397_49450204.pdf

© Алюшев В.Р., 2024

К.А. БАРАБАНОВ, Л.И. ЛЕВЧЕНКО

kb5233@yandex.ru, levchenko.li@ugatu.su

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. **И.И. ЯМАЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ СТАТОРОВ С ОБМОТКОЙ НА ПЕЧАТНОЙ ПЛАТЕ В СИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЯХ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ: ОБЗОР СОВРЕМЕННОГО СОСТОЯНИЯ И ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ

Аннотация: данная статья посвящена изучению синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), с применением статоров, выполненных на печатной плате. Описывается текущее состояние технологий, анализируются основные преимущества и недостатки таких статоров. Статья освещает последние разработки в этой области, рассматривает ключевые вызовы и предлагает перспективы будущего развития.

Ключевые слова: синхронные двигатели с постоянными магнитами; печатные платы.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами (СДПМ) получили большое распространение в современной промышленности благодаря своей высокой эффективности, надежности и способности обеспечивать значительный крутящий момент при компактных габаритах и сниженной массе. В рамках последних десятилетий научное сообщество и промышленность активно работают над усовершенствованием этих характеристик через внедрение новаторских решений в конструкцию СДПМ.

СДПМ со статорами на печатной плате демонстрируют ряд преимуществ по сравнению с традиционными конструкциями, включая уменьшенный форм-фактор, сниженное энергопотребление и повышенную точность работы. Эти особенности делают двигатели на печатных платах идеальным решением для применения в областях, требующих компактных и высокоэффективных систем электропривода.

Концепция использования печатных плат в качестве статоров электродвигателей была впервые предложена в 1960-х годах [1]. Несмотря на давнюю историю этой идеи, эффективность и широта применения электродвигателей с такими статорами столкнулись с рядом технологических и экономических ограничений. К числу ключевых факторов, влияющих на их распространение и функциональность, относятся:

- Основным лимитирующим фактором в разработке синхронных двигателей с постоянными магнитами (СДПМ), использующих статоры на печатных платах (ПП), является необходимость обеспечения высокой токовой нагрузки. Печатные платы традиционно сталкиваются с ограничениями максимально возможного тока через медные проводники, что требует применения многослойных структур для

увеличения токопроводимости. Это, в свою очередь, ведет к удорожанию производства. Дополнительной проблемой является нагрев проводников, требующий эффективных механизмов теплоотведения. Эти факторы исторически ограничивали максимальную мощность СДПМ с статорами на ПП. Однако современные достижения в области технологий позволили снизить стоимость изготовления многослойных ПП и значительно улучшить системы теплоотвода для таких двигателей [2].

- Другой критический аспект заключается в использовании магнитов для изготовления ротора, способных создавать достаточное магнитное потокосцепление для генерации высокой мощности. Ранее ограничения в материалах магнитов сдерживали потенциал применения высокоэффективных СДПМ.

Однако с развитием сопутствующих технологий идея применения ПП в качестве статора начала набирать актуальность в виду следующих преимуществ

- Малый размер: РСВ моторы идеально подходят для использования в ограниченных пространствах, таких как медицинские устройства, робототехника, дроны и носимые устройства. Их компактные размеры позволяют максимально эффективно использовать доступное пространство.

- Возможность настройки: Эти двигатели могут быть настроены и адаптированы к специфическим требованиям, включая размер, форму и материалы компонентов, что позволяет им идеально вписываться в тесные пространства различных сферах применения.

- Низкое энергопотребление: РСВ моторы потребляют меньше энергии, что делает их подходящими для батарейных устройств, включая медицинские устройства, где критически важно минимизировать потребление энергии.

- Низкий уровень вибрации и шума: РСВ моторы характеризуются низким уровнем вибраций и шума, в отличие от классических СДПМ, где наличие зубцовой структуры статора влияет на пульсации момента.

Сферы применения таких машин:

Робототехника: РСВ двигатели идеально подходят для использования в малых робототехнических приложениях, таких как дроны или миниатюрные роботы. Исследование показало, что двигатель с диаметром 12 мм и высотой 10 мм обладает эффективностью 80% при нагрузке 0.05 Нм [4].

Медицинские устройства: Эти двигатели могут использоваться в медицинских устройствах, включая хирургические роботы, имплантируемые устройства и другое медицинское оборудование, благодаря их низкому энергопотреблению и тихой работе. Исследование выявило, что двигатель с диаметром 10 мм и высотой 5 мм потребляет всего 0.5 Вт при нагрузке 0.1 Нм [5].

Автомобильная промышленность: РСВ двигатели находят применение в электромобилях для таких функций, как усилители руля, системы кондиционирования воздуха и тормозные системы. Один из исследованных двигателей с диаметром 25 мм и высотой 15 мм демонстрирует эффективность 90% при нагрузке 1.5 Нм [6].

Аэрокосмическая промышленность: В аэрокосмической отрасли РСВ двигатели используются в таких системах, как системы позиционирования спутников, системы ориентации солнечных панелей и системы наведения антенн. Исследование показало, что двигатель с диаметром 15 мм и высотой 7 мм обеспечивает максимальный крутящий момент 0.15 Нм и максимальную скорость 12,000 об/мин [7].

Бытовая электроника: благодаря малому размеру и низкому энергопотреблению РСВ двигатели находят применение в различных бытовых электронных изделиях, таких как камеры, смартфоны и носимые устройства. Исследование отметило, что двигатель с диаметром 8 мм и высотой 2 мм потребляет всего 0.06 Вт при нагрузке 0.02 Нм [8].

Применение статора на ПП в СДПМ открывает широкие возможности по реализации конструкции СДПМ в плане конфигурации статора и ротора. Типовые конструкции представлены на рисунке 1 [9].

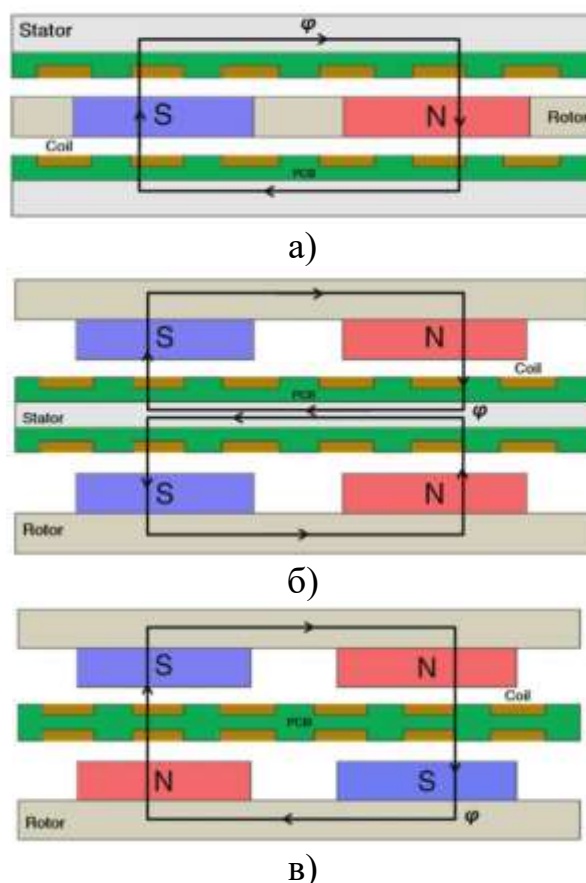


Рис. 1. Конфигурации конструкции СДПМ со статором на ПП
 а) конфигурация с двойным статором; б) конфигурация с двойным ротором и статором с магнитопроводом; в) конфигурация с двойным ротором

Несмотря на преимущества технологии статора на ПП коммерческое производство данных типов СДПМ на данный момент имеет малое распространение.

Компания ECM PCB Stator Tech – это инновационный стартап из Массачусетса, который стремится изменить подходы к взаимодействию с

электрическими машинами [10]. Основная миссия компании — предоставить инженерам и дизайнерам продуктов возможность не ограничиваться стандартным каталогом электродвигателей с фиксированными размерами, скоростями и крутящими моментами. На рисунке 2 показан концепт строения двигателей компании ECM PCB Stator Tech.

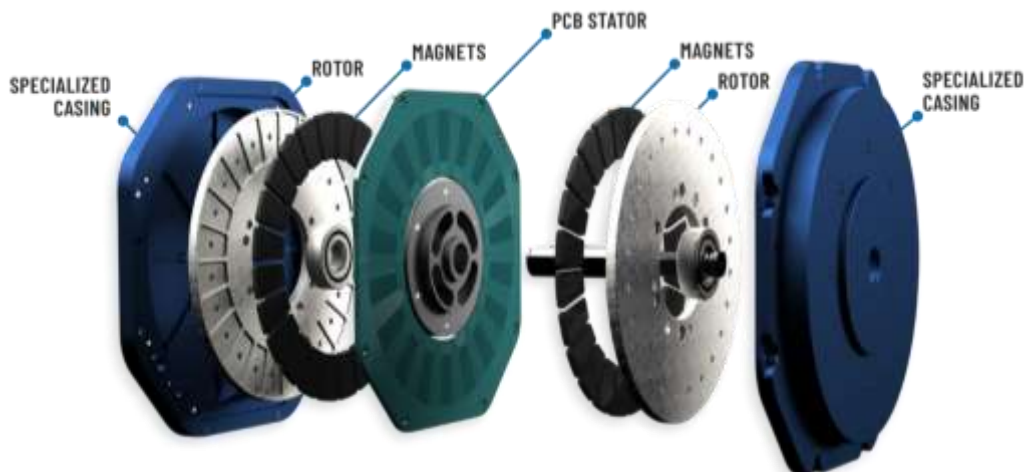


Рис. 2. Разбор двигателя компании ECM PCB Stator Tech

ЕСМ предлагает программную платформу для дизайна, PrintStator, которая позволяет пользователям получать доступ к оптимизированным электродвигателям с печатными статорами, специально разработанным для конкретных приложений. Эта платформа облегчает создание моторов, идеально подходящих под индивидуальные потребности и спецификации проекта, что делает ЕСМ лидером в области инновационных решений для электродвигателей, линейка которых показана на рисунке 3.



Рис. 3. Серийные изделия компании ECM PCB Stator Tech

Основной упор данной компании сделан на разработки и поддержание программного обеспечения, направленного на проектирование и разработку подобного типа двигателей PrintStator Motor CAD.

Infinitum, базирующаяся в Техасе, является новаторской компанией в области производства электродвигателей, стремящейся сделать их более эффективными и экологичными [11]. Они разрабатывают моторы, которые меньше, легче и тише традиционных, что открывает новые возможности для устойчивого дизайна, показанного на рисунке 4. Компания активно применяет передовые технологии, такие как фотолитография и химическое травление, для производства своих моторов, что позволяет им предлагать индивидуальные решения для различных приложений, включая медицинские устройства и автомобильную промышленность. На рисунке 5 изображен внешний вид двигателя компании

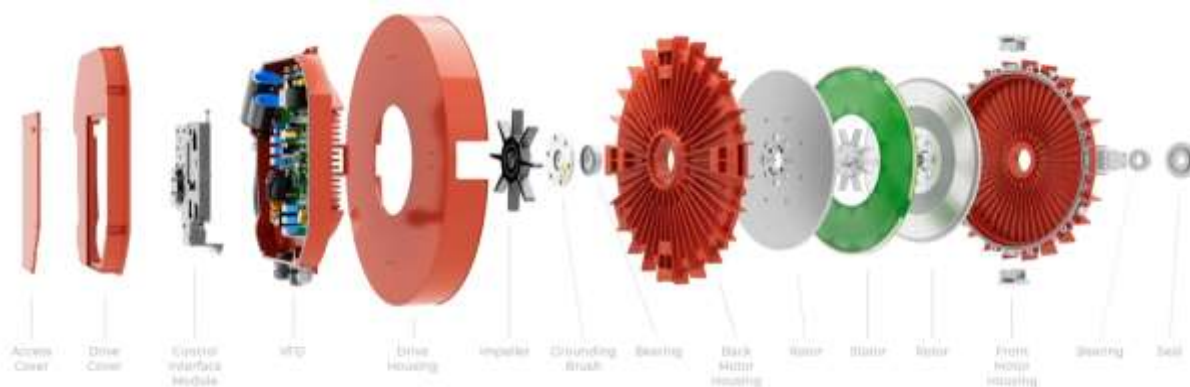


Рис. 4. Двигатель компании Infinitum в разборе

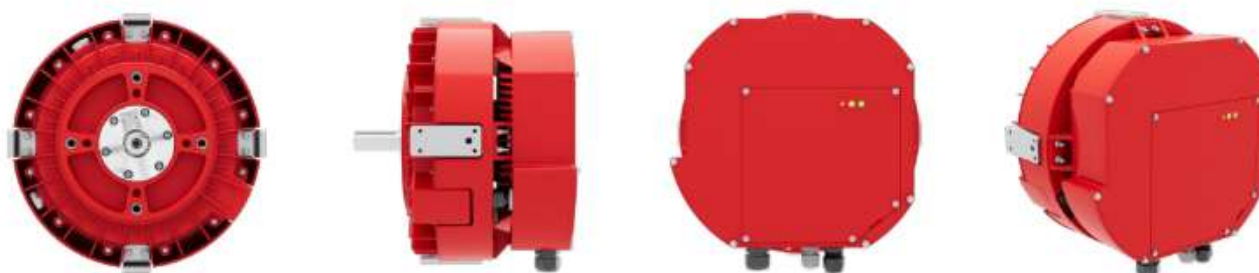


Рис. 5. Пример двигателя от компании Infinitum

В статье были рассмотрены технологические инновации и применения этих устройств в различных отраслях. РСВ моторы демонстрируют значительные преимущества в виде компактности, низкого энергопотребления и высокой точности, что делает их идеальными для использования в медицинских устройствах, робототехнике, автомобильной и аэрокосмической промышленности. Однако они также сталкиваются с некоторыми техническими и производственными вызовами, такими как ограничения по мощности и термическое управление.

Библиографический список

1. Barton, T.H. (1961). Design and development of printed circuit motors. *IEEE Transactions on Industry and General Applications*, 90(1), 70-78.
2. F. Tokgoz, Ö. Gülsuna, F. Karakaya, G. Cakal and O. Keysan, "Mechanical and Thermal Design of an Optimized PCB Motor for an Integrated Motor Drive System With GaNFETs," in *IEEE Transactions on Energy Conversion*, vol. 38, no. 1, pp. 653-661, March 2023, doi: 10.1109/TEC.2022.3213896.
3. "Review of PCB Motors: Advancements and Applications", *International Journal of Emerging Technologies and Innovative Research (www.jetir.org)*, ISSN:2349-5162, Vol.10, Issue 6, page no.j156-j162, June-2023.
4. F. Liu, D. Xue, Y. Li, and H. Ding, "Development of a new type of printed circuit board motor," *Journal of Applied Physics*, vol. 126, no. 10, pp. 104502, 2019. DOI: 10.1063/1.5111134.
5. T. Ogasawara, T. Ota, and M. Ohtani, "Development of printed circuit board motor and application to implantable medical devices," in *2018 IEEE 30th International Conference on Micro ElectroMechanical Systems (MEMS)*, pp. 696-699, 2018. DOI:10.1109/MEMSYS.2018.8346662.
6. W. Zhang, J. Deng, Y. Xie, Y. Zhang, and J. Wang, "Design and analysis of a novel printed circuit board motor for electric vehicle application," in *2018 13th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, pp.1278-1282, 2018. DOI:10.1109/ICIEA.2018.8397904.
7. L. Zhang, S. Zhang, and X. Liu, "Development of a printed circuit board motor for space applications," in *2019 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA)*, pp. 8006-8011, 2019. DOI: 10.1109/ICRA.2019.8794282.
8. S. Sun, Y. Wang, J. Zhao, L. Zhao, and Z. Liu, "Design and analysis of a miniature printed circuit board motor for portable devices," in *2017 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*, pp. 155 160, 2017. DOI: 10.1109/ICMA.2017.8015765.
9. Taqavi, O. and Mirimani, S.M. (2020), Design aspects, winding arrangements and applications of printed circuit board motors: a comprehensive review. *IET Electric Power Applications*, 14: 1505-1518. <https://doi.org/10.1049/iet-epa.2020.0141>.
10. ECM PCB Stator Tech. URL: <https://pcbstator.com/> (дата обращения: 15.05.2024).
11. Infinitum. URL: <https://goinfinitum.com/> (дата обращения: 16.05.2024).

© Барабанов К.А., Левченко Л.И., 2024

Р.Д. ГАЛИЕВ

ramagaliev@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, **О.А. ЮШКОВА**

Уфимский университет науки и технологий

ВЫБОР ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ ДЛЯ РОБОТОТЕХНИЧЕСКИХ СИСТЕМ: ОСОБЕННОСТИ И РЕКОМЕНДАЦИИ

Аннотация: в статье рассматривается применение робототехнических систем, различные типы электродвигателей для робот-гуманоида и четвероногого робота, подчеркивая их конструктивные особенности при проектировании и возможным способом их улучшения. Анализируются двигатели от известных производителей, и оценивается их пригодность для гуманоидных и четвероногих роботов.

Ключевые слова: робототехнические системы, робот, высокий крутящий момент, компактный привод, низкооборотный двигатель, синхронный двигатель с постоянными магнитами.

Современная робототехника находится на стыке технологий, где электрические машины играют ключевую роль. Роботы-гуманоиды и четвероногие платформы становятся всё более популярными благодаря своему потенциалу в различных сферах: от помощи человеку до промышленных и исследовательских задач.

Одним из важнейших компонентов таких роботов являются электродвигатели, которые обеспечивают движение и управление. Правильный выбор двигателя напрямую влияет на функциональность и эффективность робота [1].

Применение роботов и их особенности

Роботы стали неотъемлемой частью современного общества, находя применение в самых разных сферах. Они представляют собой автоматические устройства, способные выполнять задачи, которые раньше выполнялись людьми. Современные роботы могут не только выполнять физические действия, но и принимать решения на основе анализа данных, что делает их универсальными помощниками в различных областях. Ниже представлена классификация роботов по их конструктивным особенностям и функциональным возможностям. [2, 3]

Бионические роботы-собаки

Unitree Go2 Air используется для инспекций, исследовательских миссий, обучения и развлечений. Благодаря компактным размерам 70×31×40 см и весу 15 кг, он легко маневрирует в ограниченных пространствах. Грузоподъёмность до 10 кг делает его подходящим для транспортировки небольших грузов.

Синхронные двигатели с постоянными магнитами управляют движением суставов, включая корпус, бёдра и хвостовики, с точностью и плавностью. Unitree

Go2 Air осуществляет передвижение с помощью 12 суставов, по 3 на каждую ногу. Максимальный крутящий момент электропривода составляет 45 Нм.[4]

Дополнительным усовершенствованием может стать оснащение робота роботизированной рукой, что позволит расширить его функционал. Это делает его более полезным в транспортировке грузов, выполнении мелких задач в ограниченных пространствах или даже в качестве персонального помощника.

Deep Robotics JY X20 создан для автономной инспекции промышленных объектов, эффективно выполняя задачи без участия человека.

Данный робот предназначен для промышленной инспекции и мониторинга. Его устойчивость к погодным условиям, защита от пыли и влаги и способность преодолевать лестницы и препятствия делают его эффективным для патрулирования заводов, складов, горных выработок и других сложных объектов. Робот может использоваться для выявления неисправностей, транспортировки оборудования и выполнения задач с помощью дополнительных модулей, таких как манипулятор или навигационные системы.

Робот с грузоподъемностью 20 кг и максимальной статической нагрузкой до 85 кг подходит для транспортировки оборудования. Компактные размеры 95×47×70 см и вес 50 кг делают его удобным для использования в промышленных помещениях и на открытых площадках. [5]

Гуманоидные роботы

Unitree G1 — робот-гуманоид высотой 132 см и весом 35 кг, а размах рук — около 45 см, также он может складываться до компактных размеров 690×450×300 мм, что удобно для транспортировки и хранения. Он оснащён ИИ-модулем и от 23 до 43 степенями свободы в зависимости от моделей, что позволяет гибко поворачивать корпус и конечности на 180°, прыгать и самостоятельно подниматься.

Робот способен манипулировать объектами с помощью пятипалых или трёхпалых манипуляторов, регулирующих силу и чувствительность, что позволяет ему выполнять сложные задачи, такие как аккуратное удержание и перекладывание предметов.

G1 используется в сферах образования, обслуживания, логистики и медицины, выполняя задачи, связанные с манипуляцией с предметами, помощью в торговле и сортировке товаров, а также для демонстрации технологий на мероприятиях.[6]

Человекоподобный робот Xiaomi CyberOne предназначен для самостоятельного передвижения, переноски предметов и распознавания человеческих эмоций, однако основное назначение — помощь по дому.

Рост составляет 177 см, вес — 52 кг, движение суставов осуществляется с помощью электропривода, максимальный крутящий момент которого 300 Нм. Данный робот поддерживает до 21 степени свободы движения и обеспечивает скорость реакции в реальном времени 0,5 мс для каждой степени свободы. Размах рук CyberOne составляет 168 мм и на одной руке может выдержать гирию до 1,5 кг. [7]

Atlas boston dynamics – это гуманоидный робот высотой 175 см и весом около 75 кг, разработанный компанией Boston dynamics для выполнения задач в реальных

условиях. Оснащённый 28 суставами, лидарами и стереокамерами, он обладает высокой мобильностью и точностью движений. Робот полностью электрический и может работать без гидравлических компонентов

Atlas применяется в промышленности для автоматизации процессов, включая манипуляции с объектами, в логистике для транспортировки грузов, а также в экстренных службах для проведения поисково-спасательных операций в сложных условиях. Он также служит платформой для исследований в области робототехники и искусственного интеллекта, демонстрируя автономное передвижение и взаимодействие с окружающей средой. [8]

Tesla Optimus известен также, как Tesla Bot – универсальный робот-гуманоид, который производится и разрабатывается известной компанией Tesla, Inc. Данный робот предназначен для взаимодействия с человеком, производить рутинные операции, которые люди не хотят делать, также обладает функциями распознавания лиц и обработки естественного языка. Данный робот имеет чип Tesla и технологию переключения интеллекта.

Робот Optimus весит 73 килограмма, его рост составляет 173 сантиметра. Было отмечено, что робот ориентируется в пространстве при помощи датчиков, которые используются в автопилоте электромобилей Tesla. Руки робота имеют 27 степеней свободы, а тело — более 200. Именно благодаря такой подвижности, они и смогут выполнять широкий спектр задач. [9]

Zhiyuan Robotics Yuanzheng A1 – это модель гуманоидного робота, которую представила китайская компания Zhiyuan Robotics в 2023 году.

Рост Yuanzheng A1 составляет 175 см, вес — 53 кг, 49 степеней свободы во всём теле, может нести груз весом 80 кг. Максимальная нагрузка на одну руку — 5 кг. Expedition A1 не только похож на человека по форме, но и демонстрирует передовые в отрасли возможности в области двуногой ходьбы, интеллектуальных задач и взаимодействия человека с компьютером. В будущем он сможет автономно выполнять мобильные и рабочие задачи в различных сложных условиях. [10]

В конструкции человекоподобных роботов (Рис. 1) используется линейное и вращательное движение, которое обеспечивает траекторию движения роботов. Линейное движение приводом обеспечивает движение по прямой для разгибания или сгибания коленей. Вращательное движение вокруг оси, например, плечевые и запястные суставы.

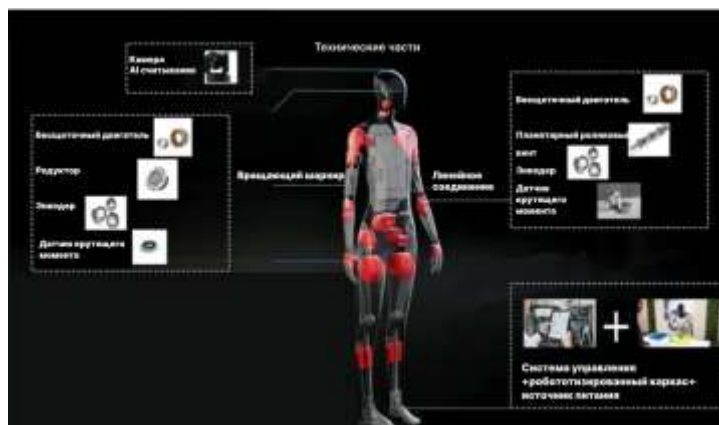


Рис. 1. Структурная схема компонентов в роботах [6]

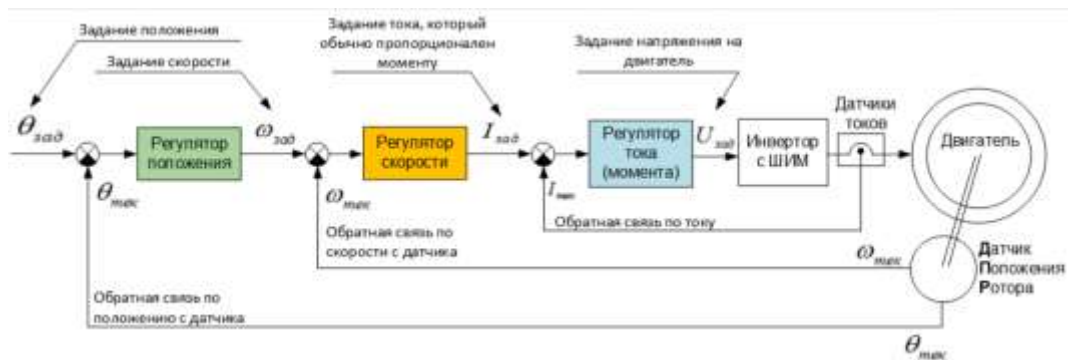


Рис. 2. Классическая схема замкнутой системы управления приводом с тремя контурами обратной связи [11]

На Рис. 2 представлена система управления электродвигателем робота, которая включает три уровня регулирования: положения, скорости и тока.

- Задание положения ($\theta_{зад}$) поступает на регулятор положения. Этот регулятор сравнивает его с текущим положением ($\theta_{тек}$) от датчика положения и формирует задание скорости ($\omega_{зад}$).

- Задание скорости ($\omega_{зад}$) передается на регулятор скорости, который сравнивает его с текущей скоростью ($\omega_{тек}$) от датчика и формирует задание тока ($I_{зад}$), пропорциональное требуемому моменту.

- Регулятор тока (момента), используя обратную связь по току ($I_{тек}$) от датчиков токов, создает задание напряжения ($U_{зад}$) для инвертора.

- Инвертор с ШИМ преобразует $U_{зад}$ в управляющие сигналы для питания электродвигателя.

- Датчики положения ротора обеспечивают обратную связь по угловой позиции двигателя ($\theta_{тек}$), замыкая всю систему управления. [1]

Таким образом, система обеспечивает точное управление положением, скоростью и моментом двигателя.

Например, в Zhiyuan Robotics Yuanzheng A1 привод с передаточным числом 10 обеспечивает высокий крутящий момент до 350 Нм, при этом в нем интегрированная система жидкостного охлаждения. Вес данного привода составляет 1,6 кг.

Для обеспечения требуемых технических характеристик (параметров) необходимо осуществить правильный выбор двигателя для электропривода. Ниже приведена

Таблица 1, в которой представлены аналоги моторов на рынке.

Таблица 1

Сравнение электродвигателей и электроприводов для робототехнических задач [12]

Наименование мотора	Габаритные размеры ($D_{корп} * L$), мм	Макс. крутящий момент, Нм	Кол-во оборотов, об/мин	Мощность, Вт
1	2	3	4	5
EMRAX 208	208*85	150	6000	86000
Hacker QSL-150-25-4	150,2*80	15,26	6250	9990

1	2	3	4	5
ROTEX REG 20-4	114*72	11,14	6000	7000
T-Motor Antigravity MN1005 KV90 v2	107*23	3,58	3996	1500
T-Motor U10 Plus KV100 [16]	86,8*43	3,65	4440	1700

Мотор EMRAX 208 имеет большие габаритные размеры, которые затрудняют интеграцию в компактные конструкции роботов, подходит для мощных роботов, работающих с высокими нагрузками, но требует большого пространства. Hacker QSL-150-25-4 имеет хороший крутящий момент для электродвигателя, требующего повышение с помощью редуктора для движения исполнительных механизмов робота. ROTEX REG 20-4 имеет меньше габаритные размеры и достигает средние показатели для по крутящему моменту. T-Motor Antigravity MN1005 KV90 v2 и T-Motor U10 Plus KV100 имеют большой диаметр, но меньшую длину активной части, благодаря этому высокий крутящий момент при маленькой массе. Во всех моторах используются большое количество оборотов и большая мощность, однако для робота для обеспечения плавности движения исполнительных механизмов требует не только высокий крутящий момент, но и низкие обороты и небольшую мощность.

Для оптимального двигателя для робота необходимо:

Крутящий момент: баланс между высокой нагрузкой и компактностью. около 10–15 Н·м. Габариты: компактные размеры, менее 150 мм в диаметре и в длину не более 70 мм. Мощность: в пределах 0,5–2 кВт для обеспечения универсальности. КПД: 80–90% для энергоэффективности.

На основе анализа наиболее оптимальным вариантом является Hacker QSL-150-25-4 или ROTEX REG-20-4, с возможной адаптацией параметров.

Анализ аналогов показал отсутствие электродвигателей с оптимальными параметрами для робота. Необходимо спроектировать электродвигатель с низкими оборотами, высоким моментом и компактными размерами. Выявленные модели не полностью соответствуют требованиям робототехнических систем. Даны рекомендации для создания такого двигателя.

Библиографический список

1. Шахинпур, М. Курс робототехники. Пер. с англ. — М.: Мир, 1990. — 526 с.: ил. ISBN 5-03-001375-X (глава 5)
2. Humanoid Robot: A Review of the Architecture, Applications and Future Trend / Ting Chen-Hunt, Yeo Wei-Hong, King Yeong-Jin [и др.] // Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology . – Maxwell : Scientific Organization, 2014. – С. 1364-1369.
3. Лесков А.Г., Бажинова К.В., Селиверстова Е.В. Описание кинематики антропоморфных роботов методом блочных матриц // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2018. № 6. С. 102–111. DOI: 10.18698/0236-3933-2018-6-102-111

4. Robosobaka // Робот Unitree Go2 Air URL: <https://robosobaka.ru> (дата обращения: 13.11.2024).
5. Robosobaka // Deep Robotics JY X20 URL: <https://robosobaka.ru> (дата обращения: 13.11.2024).
6. Unitree // Unitree G1 URL: <https://www.unitree.com/g1/> (дата обращения: 13.11.2024).
7. Mi-Home // Xiaomi CyberOne URL: <https://mi-home.pl/en/products/xiaomi-cyberone> (дата обращения: 13.11.2024).
8. Boston Dynamics // Atlas and beyond: the world's most dynamic robots URL: <https://bostondynamics.com/atlas/> (дата обращения: 13.11.2024).
9. Роботы Tesla Optimus: прорыв в области искусственного интеллекта или трюк с дистанционным управлением? // wylsa.com URL: <https://wylsa.com/roboty-tesla-optimus-proryv-v-oblasti-iskusstvennogo-intellekta-ili-tryuk-s-distanczionnym-upravleniem/> (дата обращения: 15.11.2024).
10. Zhiyuan Expedition A1 new product release, opening a new era of embodied intelligence URL: <https://min.news/en/news/d5a77764541dbb3d9bd29beb5ff81c79.html> (дата обращения: 13.11.2024).
11. Control engineering // Сервоприводы ХАРЗА как объект управления URL: <https://controlengrussia.com> (дата обращения: 13.11.2024).
12. Электродвигатель EMRAX 208 (MV) // Aviator RC URL: <https://www.aviator-rc.ru> (дата обращения: 15.11.2024).
13. Q150-4M 12,000 watt brushless motor // Hacker URL: <https://hackermotorusa.com/>) (дата обращения: 15.11.2024).
14. REG 20 // Rotelectric URL: <https://www.rotelectric.eu> (дата обращения: 15.11.2024).
15. T-Motor Antigravity MN1005 KV90 v2 // T-Motor URL: <https://rccopter.ru> (дата обращения: 15.11.2024).
16. T-Motor U10 Plus KV100 // T-Motor URL: <https://rccopter.ru> (дата обращения: 15.11.2024).

© Галиев Р.Д., 2024

М.В. ИВАНОВ

r.miv@bk.ru,

Науч. руковод. – канд. техн. наук **М.В. ОХОТНИКОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ИНТЕГРИРОВАННЫЙ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОР ЛЕГКОМОТОРНОГО САМОЛЕТА

Аннотация: в статье рассматривается возможность применения интегрированного стартер-генератора в легкомоторной авиации. Описаны ключевые преимущества ИСГ по сравнению с традиционными системами запуска и генерации. Приведен обзор современных двигателей внутреннего сгорания российского и зарубежного производства, а также установленных на них стартеров и генераторов, с целью оценки их технических характеристик и потенциала для интеграции с ИСГ. *Ключевые слова:* Стартер-генератор, легкомоторный самолет, интегрированная система, генератор, стартер, авиационный двигатель, энергоэффективность, надежность, массо-габаритные характеристики, техническое обслуживание

Легкомоторные самолеты широко применяются в учебной, частной и коммерческой авиации, предъявляя высокие требования к энергоэффективности, массо-габаритным характеристикам и надежности бортовых систем. Традиционно запуск двигателей внутреннего сгорания (ДВС) осуществляется отдельными стартерами, а обеспечение электропитания — автономными генераторами, механическая энергия которым передается через ременную передачу от двигателя внутреннего сгорания. Однако такая конфигурация имеет ряд ограничений, связанных с относительно высокой массой и габаритами этой системы, наличием механических передач, которые создают дополнительные потери при передаче механической энергии и повышенными эксплуатационными затратами, связанными с ремонтом передаточных устройств.

Интегрированный стартер-генератор (ИСГ) представляет собой комплексное решение, позволяющее объединить функции стартера и генератора в едином узле. Это обеспечивает компактность конструкции, уменьшение механических потерь и повышение общей эффективности системы.

Настоящая работа направлена на анализ существующих технических решений, применяемых на российских и зарубежных легкомоторных самолетах. Рассматриваются параметры силовых установок, включая мощности ДВС и характеристики применяемых стартеров. На основе проведенного обзора предложена концепция ИСГ, оптимизированного для применения в легкомоторной авиации с учетом требований надежности, массы и энергоэффективности.

Двигатели внутреннего сгорания (ДВС) легкомоторных самолетов являются ключевым компонентом силовой установки, определяющим их летно-технические характеристики. Далее рассматриваются основные параметры и особенности ДВС,

используемых на легкомоторных самолетах. В таблице 2 представлены ДВС зарубежных компаний и в таблице 3 – ДВС отечественного производства.

Таблица 2

Двигатели внутреннего сгорания для легкомоторной авиации зарубежного производства




			
	Lycoming Engines	Northwest	Gemini Diesel
Мощность двигателя, лс	300 +	10	100–300
Сухая масса, кг	100 – 300	10 – 50	50 – 100
Цикл	четырёхтактный	двухтактный	двухтактный
Число цилиндров, шт	4 цилиндра	одноцилиндровый	3 цилиндра
Частота вращения, об/мин	2575	7250	2500

Таблица 3

Двигатели внутреннего сгорания для легкомоторной авиации отечественного производства

			
	АПД-110/120	АПД-200	АПД-500
Мощность двигателя, лс	121,8	200	500
Сухая масса, кг	80	95	175
Цикл	четырёхтактный	четырёхтактный	четырёхтактный
Число цилиндров, шт	4 цилиндра	одноцилиндровый	8 (оппозитно)
Частота вращения, об/мин	1500	5500	5500

Типы и характеристики стартеров, применяемых для данных двигателей, зависят от их мощности и конфигурации. Далее будут рассмотрены конкретные стартерные системы, используемые на этих двигателях.



Рис. 1. Стартер Sky-Tec (США) (4,26 кг)

Sky-Tec часто используются с двигателями Lycoming и Continental (модели 149-12LS, 149-24LS, мощность 6,5...9,3 кВт).



Рис. 2. Стартер Rotax (Германия) (2,4 кг)

Стартеры Rotax (BRP) – штатные стартеры мощностью до 2 кВт для двигателей ДВС Rotax серии 912 и 914.

Стартеры отечественного производства – для двигателей М-14П на самолетах СМ-92 или "Корвет" применяются стартеры типа СТ-722, мощностью до 11 кВт, который представлен на рисунке 3.



Рис. 3. Стартер СТ-722 (Россия) (40 кг)

Генераторы, используемые в легкомоторных самолетах представлены на рисунках 4-6.



Рис. 4. Tempest Powerflite 28V 60A Alternator (2,3 кг)



Рис. 5. Flywheel 12V 20A Alternator (2 кг)



Рис. 6. BC410-H 14V 60A Alternator (2,6 кг)

Рассмотренные стартеры и генераторы, широко используемые на легкомоторных самолетах, представляют собой отдельные устройства, выполняющие строго заданные функции. Такая конструкция исторически оправдана для авиационных силовых установок, однако с увеличением требований к массо-габаритным характеристикам и энергоэффективности возникают значительные ограничения.

Основная проблема традиционного подхода заключается в увеличении массы и сложности системы. Раздельное выполнение функций запуска двигателя и генерации электроэнергии требует наличия двух независимых устройств с отдельными приводами, что увеличивает нагрузку на двигатель и снижает общий коэффициент полезного действия. Кроме того, механические передачи, используемые для соединения генератора с валом двигателя, приводят к дополнительным потерям энергии, усложняют техническое обслуживание и создают точки возможного отказа.

Современные тенденции в авиастроении направлены на унификацию и интеграцию функциональных систем для достижения оптимальных характеристик. Интегрированный стартер-генератор (ИСГ) представляет собой универсальное решение, в котором запуск двигателя и выработка электроэнергии объединены в одном устройстве. Такая интеграция позволяет исключить отдельный стартер и стандартный генератор, что значительно уменьшает массу системы.

Дополнительно, благодаря объединению функций, ИСГ обеспечивает прямую передачу крутящего момента от электрической машины к коленчатому валу двигателя, что исключает промежуточные механизмы и минимизирует потери. Это решение открывает новые возможности для повышения энергоэффективности самолета, особенно в условиях ограниченного запаса мощности и необходимости уменьшения расхода топлива.

Надежность системы также значительно возрастает за счет сокращения числа механических соединений, требующих регулярного обслуживания. Вместо сложных узлов с зубчатыми и ременными передачами, стартер-генератор использует более простую и эффективную электрическую схему работы.

В работе [4] представлены результаты исследования механических характеристик и оптимизация конструкции для интегрированного стартера-генератора (СТГ) для авиационного поршневого двигателя АПД-500. Также были проведены испытания опытного образца интегрированного стартер-генератора на стенде и на борту самолета Як-18Т. Экспериментальные запуски на испытательном стенде и на земле на аэродроме на борту самолета показали эффективную и надежную работу рассматриваемого в статье интегрированного стартер-генератора.



Рис. 7. Высокооборотный стартер-генератор

В статье [5] рассматривается стартер-генератор для авиационного поршневого двигателя мощностью 5 кВт. Приводятся электромагнитные расчеты и реализация стартера в железе. Рассматриваемый высокооборотный стартер-генератор показан на рисунке 1. Разработанный стартер-генератор оказался в 5 раз большим моментом, чем традиционный стартер в тех же габаритах. Также машина прошла стендовые испытания и показала свою эффективность относительно традиционных решений.

В ходе проведенного исследования рассмотрены современные технические решения в области систем запуска и генерации электроэнергии, применяемых на

легкомоторных самолетах. Анализ показал, что традиционные подходы, включающие использование отдельных стартеров и генераторов, обладают рядом ограничений, таких как увеличение массы, сложности конструкции и эксплуатационные затраты.

Предложение интеграции функций стартера и генератора в едином устройстве позволяет решить множество существующих проблем. Интегрированный стартер-генератор обеспечивает компактность, снижение механических потерь и повышение энергоэффективности, что особенно важно для легкомоторной авиации с ее строгими требованиями к весу и надежности. Кроме того, простота конструкции и сокращение числа обслуживаемых компонентов делают такие системы более адаптивными к современным эксплуатационным условиям.

Внедрение интегрированных стартер-генераторов может стать важным этапом модернизации легкомоторной авиации, способствуя улучшению ее технических характеристик и снижению эксплуатационных затрат.

Статья подготовлена при финансовой поддержке Российского научного фонда, проект № 24-29-000675.

Библиографический список

1. MacMinn, Stephen R., and William D. Jones. A very high speed switched-reluctance starter-generator for aircraft engine applications. Proceedings of the IEEE National Aerospace and Electronics Conference. IEEE, 1989.

2. Öksüztepe, Eyyüp, Ufuk Kaya, and Hasan Kurum. A review of conventional and new-generation aircraft starter/generators in perspective of electric drive applications. Aircraft Engineering and Aerospace Technology 95.3 (2023): 474-487.

3. Griffo, Antonio, et al. Design and characterization of a three-phase brushless exciter for aircraft starter/generator. IEEE Transactions on Industry Applications 49.5 (2013): 2106-2115.

4. Пронин, Егор, and Ильдус Саяхов. Механические характеристики для интегрированного стартера-генератора авиационного поршневого двигателя АПД-500. Молодежный Вестник УГАТУ 1.27 (2023): 85-89.

5. Van der Geest, M., et al. "Design and testing of a high-speed aerospace permanent magnet starter/generator." 2015 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles (ESARS). IEEE, 2015.

© Иванов М.В., 2024

М.В. ИВАНОВ, Ф.С. ХАМЗИН

r.miv@bk.ru, hamzinfan@yandex.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук **М.В. ОХОТНИКОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ОЦЕНКА НАПРЯЖЕННО-ДЕФОРМИРОВАННОГО СОСТОЯНИЯ БАНДАЖА ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ

Аннотация: в статье рассмотрен подход к оценке напряженно-деформированного состояния (НДС) бандажа электрической машины с постоянными магнитами. Представлено программное обеспечение, разработанное для быстрой оценки параметров НДС. Демонстрируются возможности визуализации результатов. Описаны основные примеры ее применения для предварительного расчета механической прочности бандажа.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние, бандаж, электрическая машина, постоянные магниты, численный анализ.

Современные электрические машины (СЭМ) с постоянными магнитами находят широкое применение в различных областях промышленности благодаря своей высокой эффективности, компактности и надежности. Одним из критически важных элементов таких машин является бандаж, обеспечивающий механическую прочность и удержание магнитов на высоких скоростях вращения. Бандаж — это узел ротора, который воспринимает действие центробежных сил, а также удерживает иные детали ротора от перемещений в радиальном направлении. Обычно имеет форму кольца.

Традиционные методы анализа НДС бандажа включают сложные численные расчеты с использованием конечно-элементного анализа (КЭА), которые требуют значительных вычислительных ресурсов и времени. В данной работе предлагается программное обеспечение, позволяющее существенно сократить время расчета НДС и предоставить пользователю удобный инструмент для предварительной оценки прочности бандажа.

Бандажные кольца являются наиболее нагруженными элементами роторов, поэтому к ним предъявляют высокие требования с точки зрения механической прочности. По этой причине в промышленности в качестве материалов для бандажных колец применяют титановые сплавы, высокопрочные не магнитные стали и КМ -(композитные материалы).

Проектирование современных конкурентоспособных изделий с повышенной весовой эффективностью при обеспечении требуемого уровня упруго-прочностных характеристик невозможно без средств автоматизированного проектирования, в данной работе рассмотрим программу, которая облегчает и ускоряет процесс выбора (подбора) материалов для бандажей роторов

электрических машин, позволяет оценить напряженно деформированное состояние под действием центробежных нагрузок.

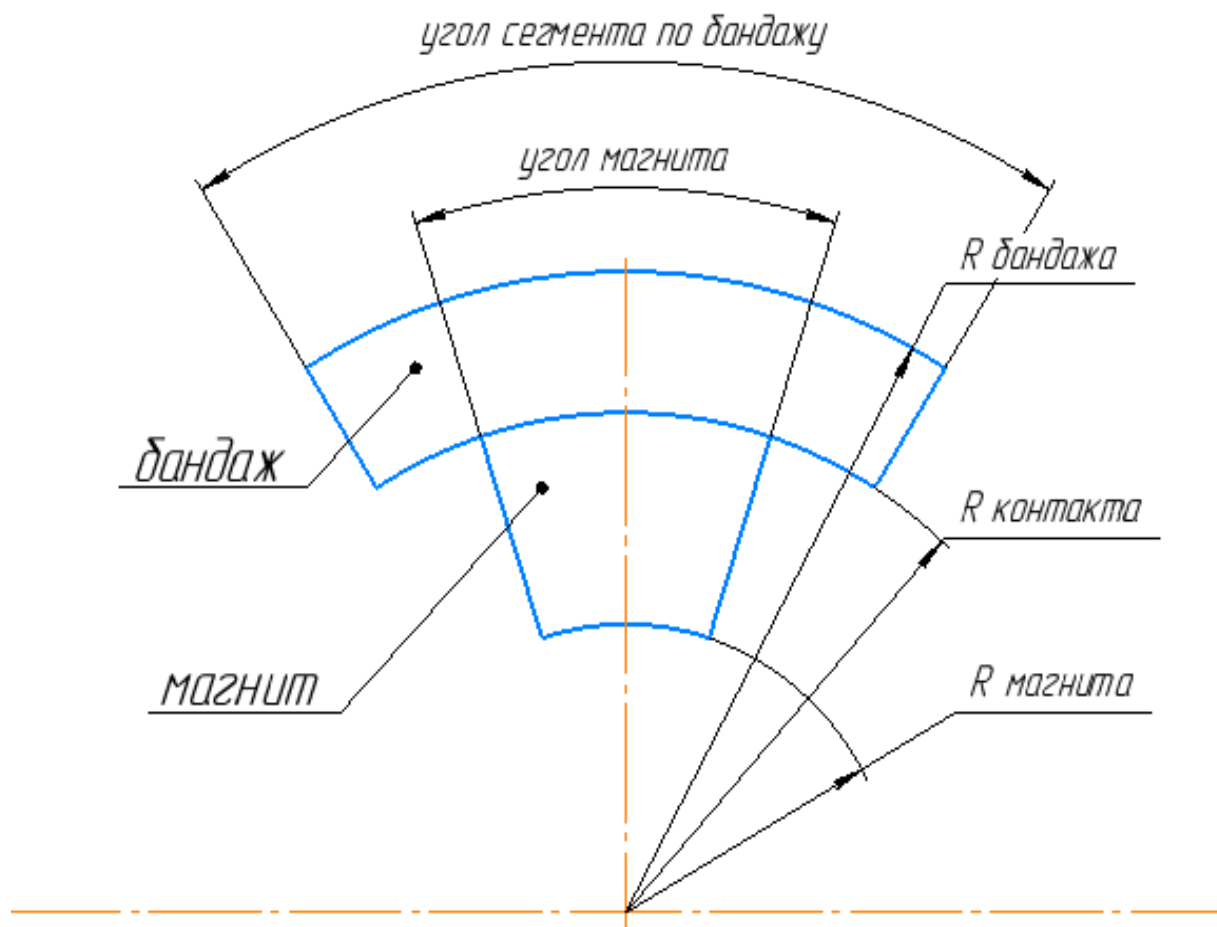


Рис. 1. Описание геометрии, задаваемой в рассматриваемом ПО

Данная программа выполняет расчет статической прочности бандажа ротора электрической машины под действием центробежных сил в 2D-постановке «Plane stress», учитывая геометрическую нелинейность. Используется прямой решатель MUMPS, для расчетной области автоматически строится неструктурированная гексагональная сетка. Приложение позволяет задавать геометрические размеры бандажа и магнитов, изменять свойства материалов, необходимые для моделирования, настраивать максимальный и минимальный размер конечных элементов, регулировать их закон роста, а также задавать коэффициент трения между поверхностями деталей, входящих в расчетную область. Расчет модели выполняется с использованием механического решателя COMSOL 6.1.

Свойства материалов можно менять в интерфейсе программы, задаются изотропные свойства. Далее математически описано поведение материалов в расчетной модели.

$$\begin{aligned} \rho a_f &= \nabla \cdot (\mathbf{FS})^T + F_v \\ \mathbf{F} &= \mathbf{I} + \nabla \mathbf{u} \\ \mathbf{S} &= \mathbf{S}_{inel} \quad \mathbf{S}_{el} \\ \zeta_{el} &= \frac{1}{2} (\mathbf{F}_{el}^T \mathbf{F}_{el} \cdot \mathbf{I}) \\ \mathbf{F}_{el} &= \mathbf{F} \mathbf{F}_{inel}^{-1} \\ \mathbf{S}_{inel} &= \mathbf{S}_0 + \mathbf{S}_{ext} + \mathbf{S}_q \\ \zeta &= \frac{1}{2} [(\nabla \mathbf{u})^T + \nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{u})^T \nabla \mathbf{u}] \\ \mathbf{C} &= \mathbf{C}(E, \nu) \end{aligned}$$

Контакт между телами принимается с трением, контактное взаимодействие описано методом «штрафов», $f_p=1$. Далее приведено математическое описание поведения контактного взаимодействия.

$$\begin{aligned} T_n &= if(g_n \leq 0, -p_n \cdot g_n, 0) \\ p_n &= f_p \frac{E_{char}}{h_{min}} \end{aligned}$$

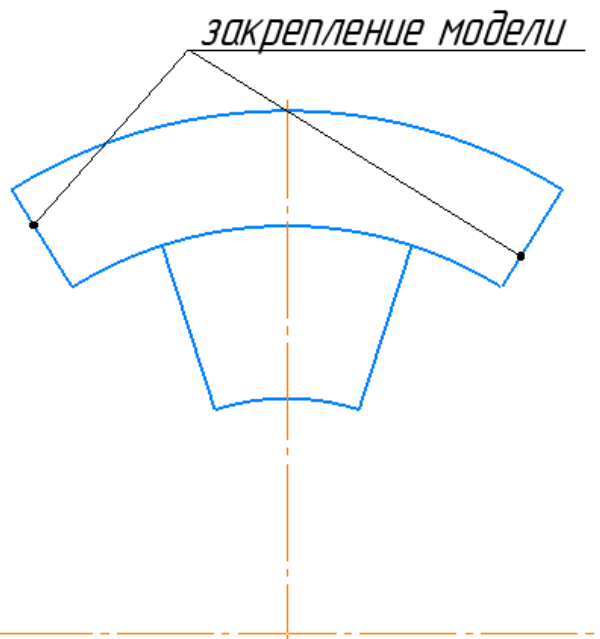


Рис. 2. Запрещены перемещения по нормали $[u \cdot n = 0]$; иные кромки модели не имеют закреплений.

Валидация приложения.

Далее проводится сравнение результатов расчетов разработанного ПО с ПО Ansys Mechanical. В качестве примера применялись геометрические характеристики и свойства материалов, показанные на рисунке 3.

Inputs		
обороты машины:	<input type="text" value="25000"/>	rpm
к-т трения между деталями:	<input type="text" value="0.15"/>	
длина активной части:	<input type="text" value="100"/>	mm
угол сегмента по бандажу:	<input type="text" value="40"/>	°
угол магнита:	<input type="text" value="20"/>	°
внешний радиус бандажа:	<input type="text" value="35"/>	mm
радиус контакта:	<input type="text" value="30"/>	mm
внутренний радиус магнита:	<input type="text" value="20"/>	mm
плотность бандажа:	<input type="text" value="7500"/>	kg/m ³
модуль упругости бандажа:	<input type="text" value="210"/>	GPa
к-т Пуассона бандажа:	<input type="text" value="0.3"/>	
плотность магнита:	<input type="text" value="8800"/>	kg/m ³
модуль упругости магнита:	<input type="text" value="200"/>	GPa
к-т Пуассона магнита:	<input type="text" value="0.27"/>	
min элемент:	<input type="text" value="0.1"/>	
max элемент:	<input type="text" value="0.5"/>	
скорость роста:	<input type="text" value="1.2"/>	

Рис. 3. Геометрические характеристики расчётной модели

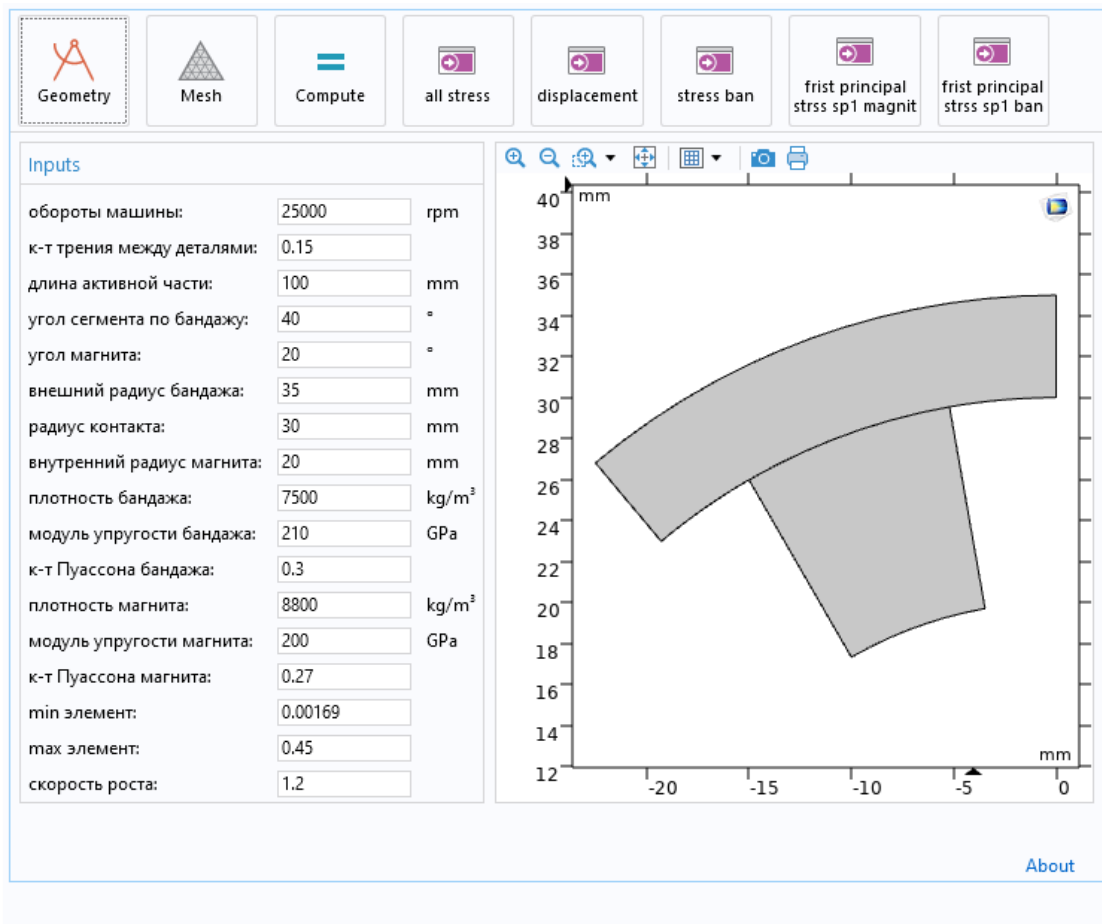


Рис. 4. Построение геометрии расчётной модели

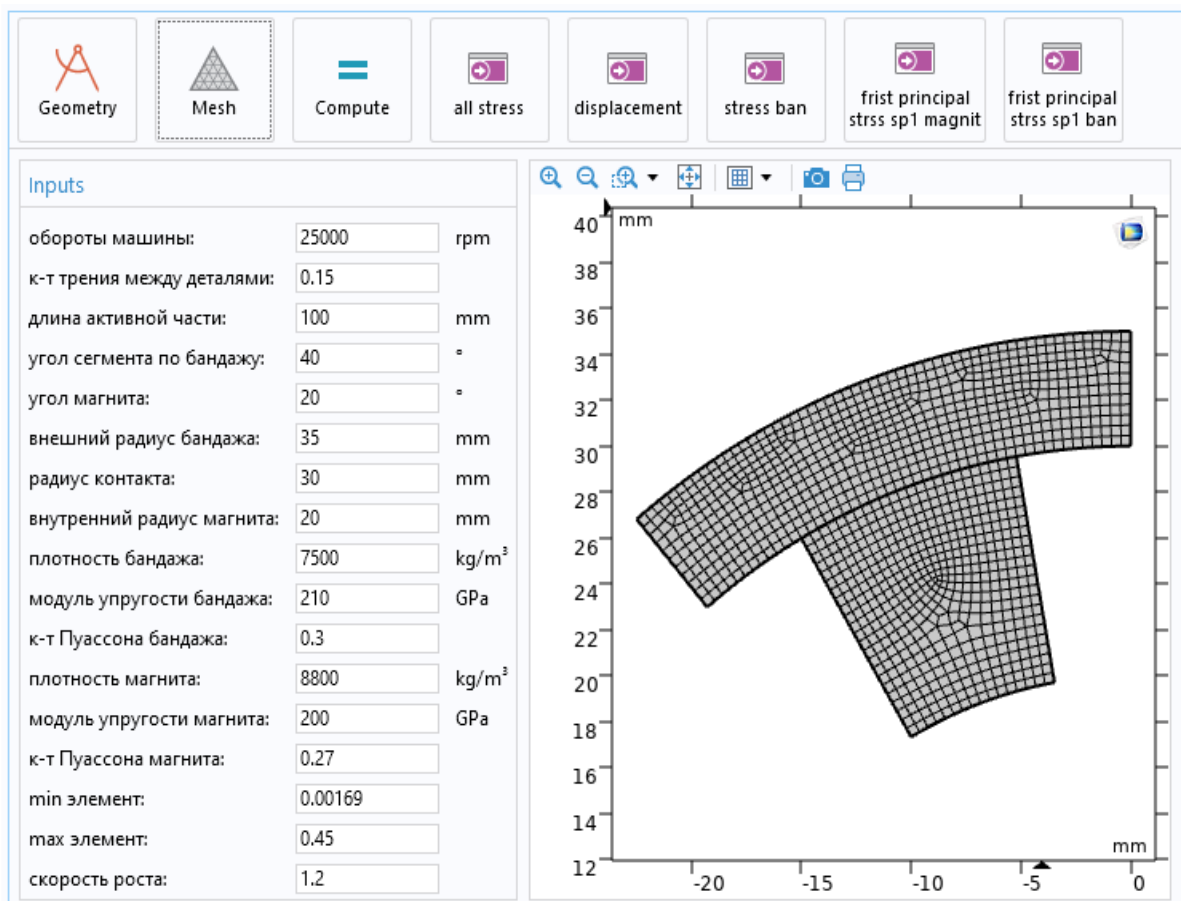


Рис. 5. Конечно элементная модель расчетной области

Свойства материалов и граничные условия идентичны постановке задачи в Ansys mechanical.

Далее на рисунках 6, 7 представлены результаты моделирования

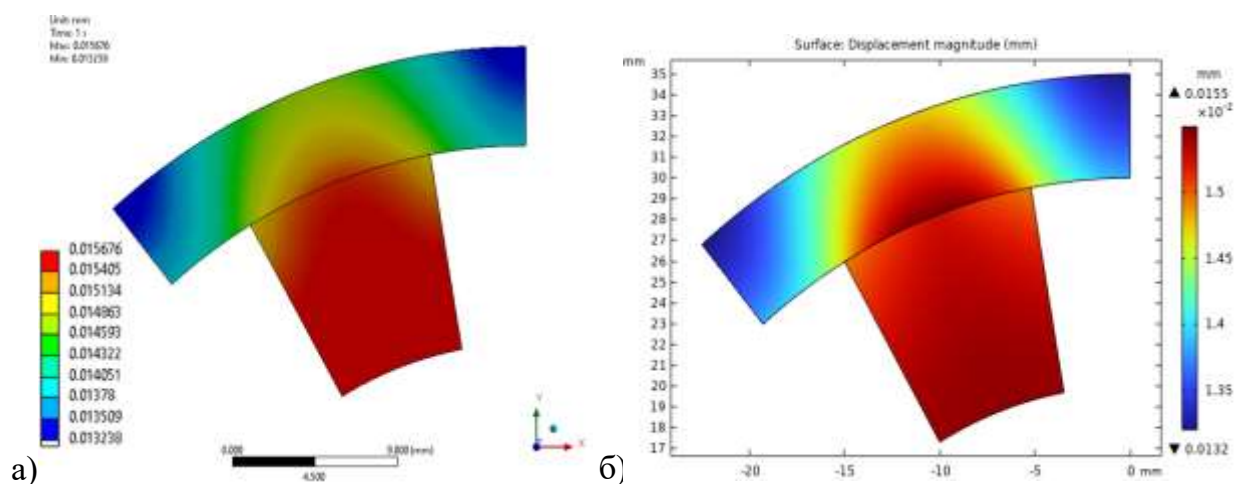


Рис. 6. Полные перемещения, рассчитанные в программном обеспечении
а) Ansys mechanical, б) разработанное ПО

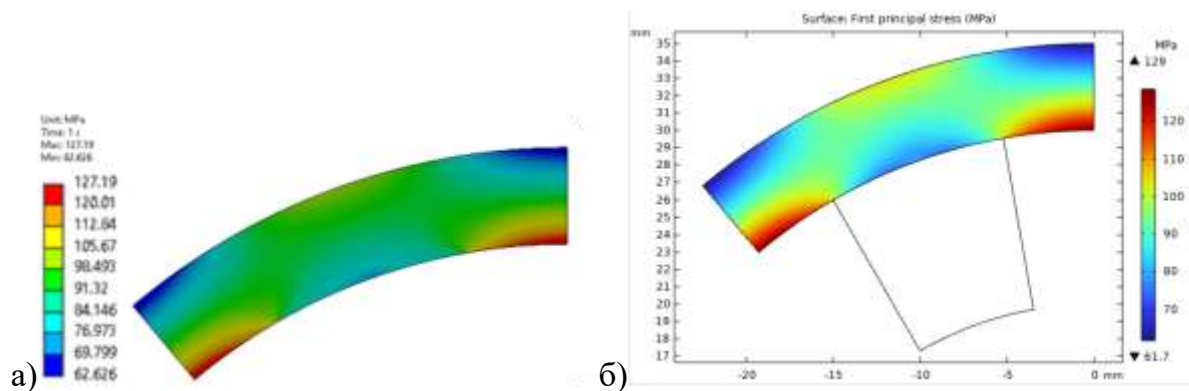


Рис. 7. Главные напряжения, рассчитанные в программном обеспечении
 а) Ansys mechanical, б) разработанное ПО

Из приведённых выше контурных графиков видно, что результаты идентичны, незначительные различия в результатах связаны с отличиями в сетке конечных элементов.

Представленное программное обеспечение демонстрирует достаточную точность и удобство в использовании для предварительного анализа НДС бандажей электрических машин. Быстрота расчетов и доступность визуализации делают его полезным инструментом для инженеров, занимающихся проектированием электрических машин.

В дальнейшем планируется расширить функционал программы, добавив возможность учета тепловых нагрузок, а также автоматическую оптимизацию конструкции бандажа.

Библиографический список

1. Сафин, А.Р., and Т.И. Петров. "Обзор моделей, алгоритмов, методов проектирования и оптимизации электрических машин." Вестник ПИТТУ имени академика МС Осими 3 (2020): 22-30.
2. Кашин, Яков Михайлович, et al. "Сквозное проектирование синхронных электрических машин с постоянными магнитами." Вестник Адыгейского государственного университета. Серия 4: Естественно-математические и технические науки 3 (186) (2016): 114-121.
3. Сафин, Альфред Робертович, et al. "Метод проектирования и топологической оптимизации роторов синхронных двигателей с постоянными магнитами." Вестник Казанского государственного энергетического университета 12.2 (46) (2020): 45-53.

© Иванов М.В., Хамзин Ф.С., 2024

УДК 537.6

Н.В. ПАНОВ, В.С. МАТВЕЕВ, В.В. ХАЗИЕВ

kyka_4002@mail.ru

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. **М.В. ОХОТНИКОВ**

Уфимский университет науки и технологий

К ВОПРОСУ ВЫБОРА ПОСТОЯННОГО МАГНИТА И МАТЕРИАЛА ОБМОТКИ СТАТОРА ДЛЯ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА, ИНТЕГРИРОВАННОГО В ГАЗОТУРБИННЫЙ ДВИГАТЕЛЬ

Аннотация: в статье рассматриваются свойства магнита и электрического проводника при повышенных рабочих температурах для подтверждения работоспособности в составе интегрированного стартер-генератора.

Ключевые слова: постоянный магнит; стартер-генератор; самарий-кобальтовый сплав SmCo.

Особенностью условий работы электрических машин, интегрированных на ротор газотурбинного двигателя (ГТД), является высокий уровень температур окружающей среды, а также её непостоянство, обусловленное работой ГТД на различных режимах.

Так, например, температура воздуха на входе в двигатель на скорости полета $M = 2$ достигает 100-150 °С в зависимости от высоты [1]. Соответственно изменяется и температура потока далее по тракту двигателя, меняется тепловое состояние элементов статора.

В связи с этим, при выборе материалов, используемых в конструкции электрической машины, интегрируемой на ротор ГТД, следует учитывать не только сочетание их оптимальных электромагнитных характеристик, но и работоспособность при повышенных температурах окружающей среды.

Так, в ходе предварительного расчета электрической машины с постоянными магнитами, с точки зрения обеспечения параметров ЭМ, в качестве материала ПМ был выбран самарий-кобальтовый сплав КС25ДЦ-240 ГОСТ 21559-76, а для обмотки статора взят никелированный медный проводник ПНЭТ-имид ТУ16-505.489-78.

В исходных данных для расчета были приняты рабочие температуры 400°С для ротора и 200 °С для статора, взятые из предварительной оценки теплового состояния внутренних полостей с учётом работы [2].

Для подтверждения работоспособности выбранных материалов при заданных температурах была проведена экспериментальная оценка сохранения свойств: для магнита была измерена остаточная намагниченность B_R [Тл] и сопротивление провода R [Ом].

В качестве опытного образца магнита взят фрагмент магнита SmCo, использовавшегося в испытаниях опытного генератора. Внешний вид фрагмента представлен на рис. 1.

Для измерения сопротивления проводника использован участок проволоки $\varnothing 0,5$ мм длиной 1 м, намотанный на металлический сердечник для уменьшения габаритов.

Для нагрева объектов до температуры 200 °С и магнита до температуры 400 °С использовалась промышленная печь модель КЭП Z100/1250 П-L-N.

Замеры остаточной магнитной индукции проводились лабораторным гауссметром, замер сопротивления – мультиметром. Для проверки проводника на пробой изоляции применялся мегаомметр.

Допустимая погрешность измерений, обусловленная суммарной погрешностью всего используемого оборудования, принята не более 5 %.



Рис. 1. Внешний вид фрагмента магнита

Измерение намагниченности выполняли щупом гауссметра на каждой грани магнита. Значения фиксировались вдоль всей грани, записывались для последующего сравнения максимальные значения. Результаты замеров сведены в таблицу 1.

Из результатов в таблице 1 четкой зависимости значений остаточной магнитной индукции от температуры нагрева, а также какой-либо тенденции к изменению значений, не выявлено.

Измерение сопротивления проводника выполняли щупами мультиметра на зачищенных от изоляции концах проводника. Результаты измерений сведены в таблицу 2.

Таблица 1

Результаты замеров остаточной намагниченности до и после нагрева фрагмента магнита

Характеристика	№ грани					
	1	2	3	4	5	6
Намагниченность до нагрева, Тл	0,400	0,455	0,442	0,436	0,422	0,431
Намагниченность после нагрева до 200 °С, Тл	0,389	0,448	0,439	0,423	0,421	0,437
Намагниченность после нагрева до 400 °С, Тл	0,389	0,453	0,445	0,420	0,426	0,429

Таблица 2

Результаты замеров сопротивления проводника до и после нагрева участка

Значение сопротивления до нагрева до 200 °С, кОм	0,01
Значение сопротивления проводника после нагрева до 200 °С, кОм	0,02
Наличие пробоя изоляции после нагрева	-

В ходе эксперимента не выявлено изменений значений остаточной намагниченности магнита SmCo после нагрева до 200 °С и 400 °С. Разница в замеренных значениях находится в пределах допустимой погрешности.

Сделан вывод о допустимости использования в расчетах ЭМ, интегрированной на ротор ГТД, табличных значений остаточной магнитной индукции, предоставленной производителем, оговоренной техническим заданием, либо измеренной на стенде.

В свою очередь, значение сопротивления проводника следует задавать с учетом температурных условий его работы.

Библиографический список

1. А.Б. Агульник, В.И. Бакулев, В.А. Голубев, И.В. Кравченко, Б.А. Крылов. Термогазодинамические расчеты и расчет характеристик авиационных ГТД /Под ред. В.И. Бакулева: Учебное пособие.: - М.: Изд-во МАИ, 2002. – 256 с.
2. А.С. Виноградов, Р.Р. Бадыков, Д.Г. Федорченко. Исследование теплового состояния опоры авиационного газотурбинного двигателя // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета (национального исследовательского университета). 2014. №5(47), ч. 1. С. 37-44.

© Панов Н.В., Матвеев В.С., Хазиев В.В., 2024

И.Д. ШАКУРОВ, А.А. САВИНЫХ

237392@stud.uust.ru, sasasavinyh381@gmail.com

Науч. руковод. – д-р техн. наук, профессор **В.Е. ВАВИЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ИЗГОТОВЛЕНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО ОБРАЗЦА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ ФАРАДЕЯ В ЦЕЛЯХ ДЕМОНСТРАЦИИ

Аннотация: в статье рассматривается история создания двигателя Фарадея, описывается процесс изготовления и объясняется принцип работы лабораторного образца данного двигателя.

Ключевые слова: двигатель фарадея; электропровод; неодимовый магнит; Майкл Фарадей; раствор электролита.

В 1821 году, вскоре после того, как датский физик и химик Ханс Кристиан Эрстед открыл явление электромагнетизма, Дэви и Уильям Хайд Волластон попытались сконструировать электродвигатель, но потерпели неудачу. Фарадей, обсудив проблему с двумя учеными, приступил к созданию устройства, которое производит как Фарадей назвал "электромагнитное вращение". Это устройство, теперь известное как гомопольярный двигатель, вызывало непрерывное круговое движение, которое создавалось круговой магнитной силой вокруг провода, который проходил в емкости с ртутью, в которую был помещен магнит; затем провод вращался вокруг магнита при подключении к источнику питания, химической батарее. Этот эксперимент лег в основу современной электромагнитной теории.



Рис. 1. Медный провод



Рис. 2. Медный провод (мятник)



Рис. 3. Неодимовый магнит



Рис. 4. Аккумуляторная батарея 3,7 В



Рис. 5. Медный провод

Двигатель Фарадея состоит из источника питания (рис. 4), электропровода (рис. 1, рис. 2, рис. 5) раствора электролита и постоянного магнита (рис. 3.). В качестве постоянного магнита мы использовали неодимовый магнит (рис. 3.). Источником питания послужила литий-ионная аккумуляторная батарея с напряжением (рис. 4.). Электропровод - медный провод длиной 1 м. с поперечным сечением $0,75 \text{ мм}^2$ (рис. 1.). В качестве раствора электролита мы взяли водный раствор хлорида натрия.

После того как мы приобрели все необходимые для сборки двигателя Фарадея компоненты, мы приступили к сборке двигателя Фарадея. Для начала мы разделили провод на три части: первая часть (рис. 5.) медный провод, который полностью очищен от изоляции и будет подключен к минусу литий-ионной аккумуляторной батареи с напряжением (рис. 4.), вторая часть (рис.1.), концы которой очищены от изоляции, подключена к плюсу литий-ионной аккумуляторной батареи с напряжением (рис. 4.), третья часть (рис. 2.) медный провод, который полностью очищен от изоляции, представляет собой маятник, который свободно закреплен ко второй части провода (рис. 1.) и должен будет совершать вращательные движения при замыкания цепи двигателя. Следующий шаг приготовить раствор электролита.

Исторически Фарадей использовал в качестве раствора электролита ртуть, но в целях безопасности мы будем использовать водный раствор хлорида натрия. Для того чтобы его приготовить мы заполнили контейнер водой и растворили в ней хлорид натрия более известный как поваренная соль. Водный раствор хлорида натрия был замешен в соотношении 105 г. хлорида натрия (поваренной соли) на 0,7 л воды.

Неодимовый магнит (рис. 3.) был размещен в центре контейнера с водным раствором хлорида натрия. Первая часть (рис. 5.) провода была погружена в водный раствор хлорида натрия. Тогда как третья часть (рис. 2.) провода подвешенная на вторую часть (рис. 1.) провода висела над постоянным магнитом (рис.3.) при этом его конец был погружен в водный раствор хлорида натрия, тем самым замыкая электрическую цепь. Воздействие постоянного магнита (рис. 3.) на электропровод, по которому течет электрический ток, приводит к тому, что

свободно подвешенная часть (рис. 2.) провода начинает вращательное движение вокруг постоянного магнита. Чтобы объяснить работу модели электродвигателя, предположим, что магнит, находящийся в центре контейнера, имеет северный полюс наверху и пусть провод маятник подключен к плюсу, тогда сила тока будет направлена вертикально вниз, а магнитный поток будет входить по направлению от магнита к маятнику, по правилу левой руки четыре пальца направлены в сторону тока, а в ладонь входит магнитный поток. Вытянутый на 90° большой палец левой руки будет показывать направление силы Ампера. Из этого следует, что сила ампера направлена вправо относительно направления от магнита к проводнику, а значит маятник будет двигаться по часовой стрелке. Если изменить полярность магнита либо направление тока, то маятник начнет вращаться в обратную сторону.



Рис. 6. Модель электрического двигателя Фарадея

Сделав модель электрического двигателя Фарадея, мы увидели, что свободно подвешенная часть провода начинает вращаться вокруг магнита при замыкании электрической цепи. Это наглядно показывает взаимодействие магнитных и электрических полей. Это изобретение позволило Фарадею доказать, что магнитное и электрическое поля неразрывно связаны друг с другом, что дало начало теории электромагнетизма.

Библиографический список

1. Гамильтон Дж. Жизнь открытий: Майкл Фарадей, гигант научной революции / Дж. Гамильтон // Random House, – Нью-Йорк. – 2002. 465 с.

© Шакуров Д.И., Савиных А.А., 2024

А.М. СУЛТАНОВ

sultanov.am@ugatu.su

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. **И.И. ЯМАЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

К ВОПРОСУ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ БЛОКОВ УПРАВЛЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация: данная статья посвящена обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС) систем управления механизацией крыла современных самолетов. Высокие требования к безопасности полета обуславливают необходимость минимизации электромагнитных помех, которые могут приводить к сбоям в работе системы и угрожать безопасности. В статье рассматриваются основные методы повышения ЭМС, включая экранирование, фильтрацию, заземление и оптимизацию печатных плат, а также анализируется влияние несовершенств экранирования на уровень помех. *Ключевые слова:* электромагнитная совместимость, блок управления, летательный аппарат.

Электромагнитная совместимость бортового оборудования является важным фактором безопасности полета. Сертифицированные требования по ЭМС являются обязательными в гражданских нормативных актах, например, требования к категориям больших и транспортных самолетов [1-3].

Система механизации крыла обычно включает две основные подсистемы: управление предкрылками (интерцепторами) и закрылками. При взлете и посадке подается сигнал с борта на блоки управления, управляющие приводами закрылок и интерцепторов. После получения команды системой посылается управляющий сигнал на силовой привод самолета для приведения в движение закрылков и интерцепторов. Датчик положения формирует сигнал обратной связи положения закрылков в блок управления. При достижении необходимого угла, блок управления формирует сигнал блокировки приводов, для фиксации поверхности крыла в заданном положении [4].

В современных самолетах используется двухканальная связь блоков управления, закрылками и интерцепторами, расположенных в разных концах крыла самолета. При подаче сигнала управления электроприводами закрылков или интерцепторов, существует вероятность выдачи ложной информации, вызванные электромагнитными помехами, что в свою очередь могут привести к функциональному сбою, влияющему на безопасность полета. Эти проблемы должны быть решены с помощью конструкции и методов проектирования, обеспечивающие ЭМС.

Существует несколько методов обеспечения электромагнитной совместимости с целью решения проблемы чрезмерного излучения индуктивных,

кондуктивным, емкостных и электростатических помех. Для блоков управления используют следующие методы обеспечения ЭМС: экранирование устройства и его компонентов, фильтрация, заземление, трассировка печатных плат и принцип размещения компонентов. Данные методы используются для снижения электромагнитных помех блока электроники от другого электронного оборудования и антенн, а также воздействия электроприводов.

Экранирование помехоэмиссионных устройств и компонентов устройства. Сутью метода является нарушение однородности пространства и появление скачка волнового сопротивления на пути распространения волны, что в свою очередь приводит к отражению/поглощению ЭМП.

Эффективность экранирования зависит от целостности конструкции корпуса, материала и его толщины.

Согласно ГОСТ IEC/TS 61000-1-2-2015 экранирование выполняется с использованием металлических барьеров для уменьшения распространения электромагнитных полей из одной области в другую. Необходимым условием является целостность конструкции экрана. Также не маловажную роль в передаче целостности сигнала играет экранирование проводов, входящих и/или выходящих из устройства.

Согласно формуле, представленной на рис. 1, можно рассчитать значение помех создаваемые неоднородностью экрана, например, при частоте 1 МГц, отверстие диаметром 1,5 мм ухудшит коэффициент экранирования K_3 , до 40 дБ, 1,5 см – до 20 дБ [5].

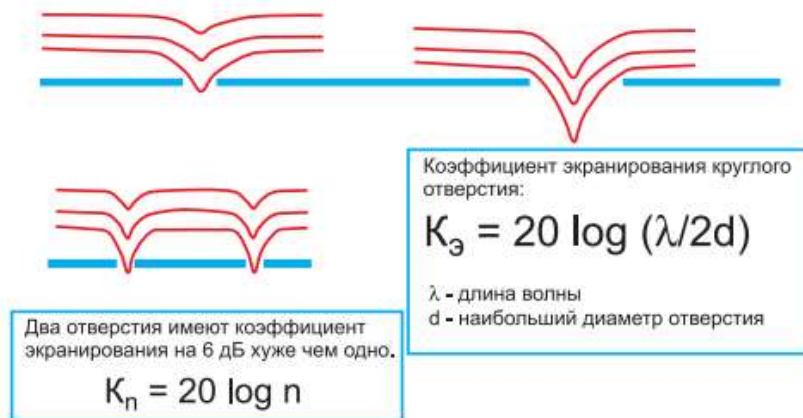


Рис. 1. Влияние целостности экрана на эффективность экранирования

При частоте 1 МГц два отверстия 1,5 мм ухудшат коэффициент экранирования K_3 до 34 дБ. Таким образом, увеличение количества отверстий ведет к ухудшению коэффициента экранирования. В случае необходимости снижения массы экрана следует уменьшить диаметр отверстий и увеличить их количество. Следовательно, при проектировании блоков управления необходимо учитывать расположение, количество и диаметр отверстий.

Для эффективного экранирования высокочастотных полей достаточно иметь тонкий экран из материала с высокой проводимостью и низкой магнитной. Для экранирования постоянных магнитных полей и низкочастотных электромагнитных полей необходимо использовать материалы с высокой магнитной проницаемостью.

Кабели, проходящие через корпус, также являются основной причиной снижения эффективности экранирования корпуса. Решением проблемы электромагнитной утечки в зазоре корпуса заключается в использовании электромагнитной уплотнительной прокладки в зазоре, представляющая собой эластичный материал, а также использование герметичных контактных соединителей с экранирующим корпусом.

Размещение компонентов. Цифровые и аналоговые схемы по возможности располагают отдельно. Интерфейсная схема размещается как можно ближе к соответствующему интерфейсу. Схема источника питания устанавливается рядом с потребителями. Схема высокой мощности размещается по возможности ближе к краю печатной платы.

Фильтрация. Помехоподавляющие фильтры необходимы для уменьшения кондуктивных помех, создаваемые источниками питания на печатных платах. Наиболее подвержены помехам аналоговые цепи и системы связи.

Существует несколько типов фильтров для борьбы с ЭМП:

- RLC-фильтры;
- Ферритовые бусины;
- Активные фильтры.

В статье [6] приведено исследование повышающего преобразователя на наличие кондуктивных помех. Был использован фильтр электромагнитных помех, основанный на LC-цепочке, показавший значительное уменьшение ЭМП на диапазоне частот от 10 кГц до 5 МГц.

Основным интерфейсом передачи данных с блока на бортовое радиоэлектронное оборудование (БРЭО) и бортовую систему технического обслуживания (БСТО) является ARINC-429. На этапе схемотехники для обеспечения целостности передачи сигнала используют фильтрующие конденсаторы, расположенные непосредственно возле входа и выхода микросхемы.

Ферритовые бусины используются для подавления высокочастотных помех при переключении транзисторов, диодов в проводах питания.

Активный фильтр представляет собой электронное устройство, использующее аналоговые или цифровые микросхемы, работающие на основе принципа обратной связи [7].

Заземление. В дополнение к фильтрации, для повышения надежности необходимо правильно спроектировать цепи возврата токов на печатной плате, разделив аналоговую, цифровую и силовую земли. При расположении фильтра ЭМП на некотором удалении от источника помех, для повышения качества заземления следует применять заземленный экран.

Цепи заземления должны иметь низкий импеданс. Это достигается путем увеличения ширины проводника. Так, например, в [8] приведен эксперимент влияния толщины заземляющего проводника на уровень помех. Результаты исследования приведены на рис. 2.

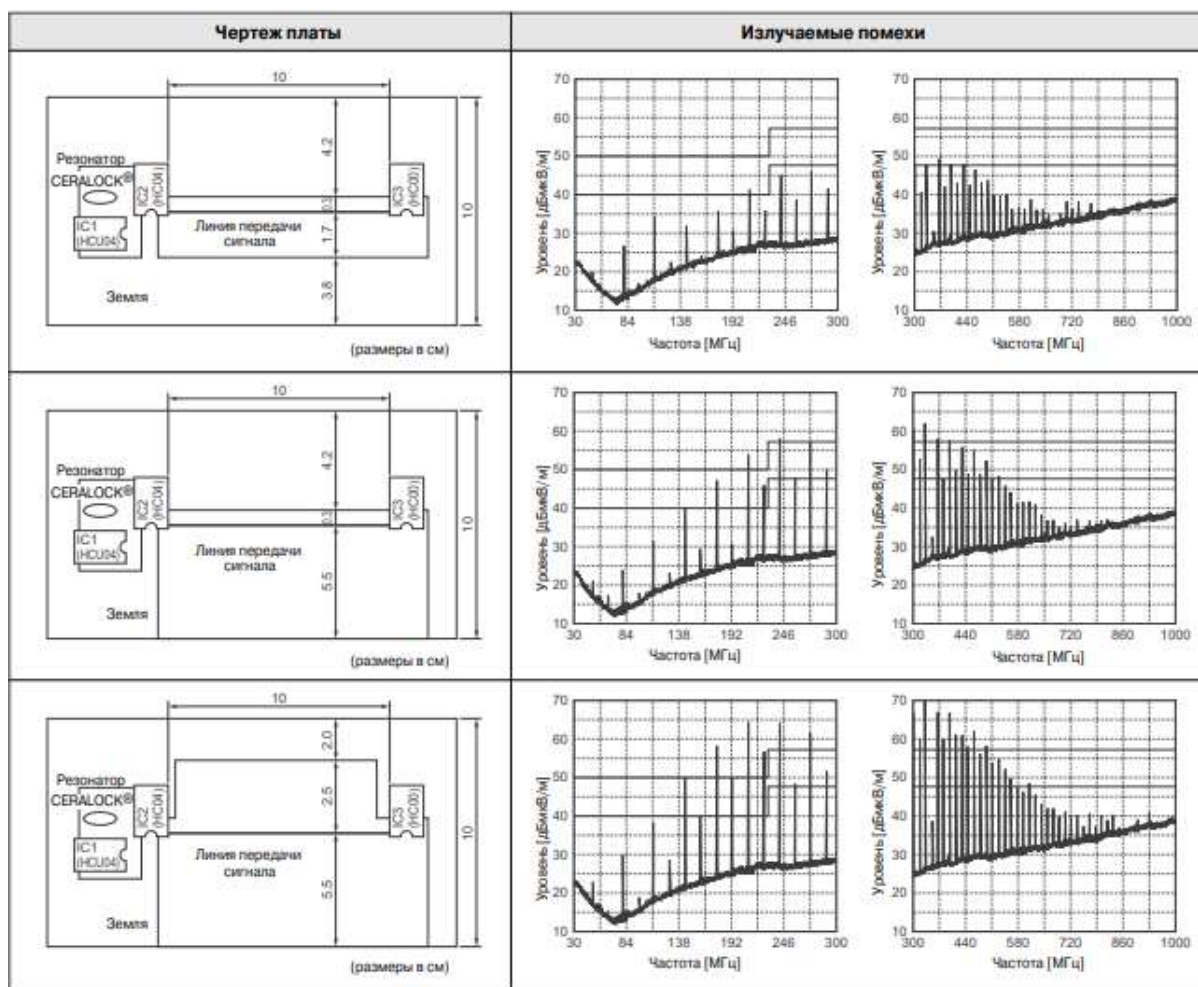


Рис. 2. Влияние толщины заземляющего проводника на уровень помех

Не существует единой универсальной методологии обеспечения ЭМС радиоэлектронных средств. Меры и методы обеспечения ЭМС на уровне электрорадиокомпонентов, печатных плат, блоков РЭС и их размещения в помещении, будут иметь существенное отличие. Одними из основных сложностей проектирования ЭМС являются:

- Ограниченное пространство. Из-за ограниченного пространства, доступного в самолетах, размер и вес устройств строго регламентированы, что способствует потенциальному конструктивному изменению экранов, оказывая влияние на электромагнитную обстановку.

- Трассировка печатных плат. На данный момент существует мало программ, позволяющих качественно оценить ЭМС после окончания трассировки. Таким образом, следуя всем рекомендациям по трассировке нет достоверности в обеспечении ЭМС.

- Создание имитационной модели схем. Для проверки на наличие кондуктивных помех в схеме необходимо точно задать параметры паразитных компонентов, что в свою очередь является трудоемким процессом.

Так образом, при проектировании блоков управлений необходимо использовать все вышеперечисленные методы, поскольку проверка на ЭМС на каждом этапе создания изделия существенно повысит надежность системы и снизит ресурсозатраты на дальнейшую корректировку изделия.

Библиографический список

1. EASA 2020 Certification Specifications and AMC's for LA CS-25 CS25.1309(a); 25.1353(a), 25.1431(c) Amendment 24 Jan
2. FAA 2020 Code of Federal Regulations Title 14, Part 25, Airworthiness Standards:Transport Category Airplanes 25.1309(a); 25.1353(a), 25.1431(c), Feb.
3. CAAC 2011 China Civil Aviation Regulation 25 R4:25.1353(a), 25.1431(c)
4. Han B. The EMC Design of Flap and Slat Electronic Control Unit //Journal of Physics: Conference Series. – IOP Publishing, 2023. – Т. 2437. – №. 1. – С. 012119.
5. Ивко А. Экранирование радиоэлектронной аппаратуры как метод обеспечения электромагнитной совместимости //Современная электроника. – 2015. – №. 8. – С. 86.
6. Султанов А. М., Уразбахтин Р.Р. Электромагнитная совместимость повышающего преобразователя энергии // Электротехнические комплексы и системы. – 2022. – С. 637-646.
7. Активные фильтры: основные принципы работы, виды и применение
URL: https://nauchniestati.ru/spravka/aktivnyefiltry/#Применение_активных_фильтров (дата обращения 15.11.2024).
7. Подавление помех с помощью фильтров EMIFIL // Murata Manufacturing Co Ltd. [Электронный ресурс]. – URL: https://www.platan.ru/docs/library/Murata_EMI.pdf (дата обращения 15.11.2024).

© Султанов А.М., 2024

А.И. ТАТАУРОВ

tataurov.ai@ugatu.su

Науч.руковод. – д-р техн. наук, профессор **В.Е. ВАВИЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

МОНИТОРИНГ И ОПТИМИЗАЦИЯ ПАРАМЕТРОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ МАШИНЫ С ПРИМЕНЕНИЕМ СВЕРТОЧНЫХ НЕЙРОННЫХ СЕТЕЙ

Аннотация: в статье рассмотрена возможность применения нейронных сетей в замену традиционным способам мониторинга работы электрических машин, с применением искусственного интеллекта для оптимизации параметров с целью повышения срока службы машин и снижения вероятности наступления отказа.

Ключевые слова: сверточная нейронная сеть, обучение сети, предварительная обработка, осциллограф, драйвер, электрическая машина, оптимизация параметров.

В данной статье на основе данных работы электрической машины (ЭМ), полученных с осциллографа, сформированы этапы исследования, которые позволят создать систему, предсказывающую оптимальные параметры работы ЭМ в различных режимах работы (запуск, останов, номинальная нагрузка, перегрузка и т.д.) с использованием сверточной нейронной сети (CNN).

В последние годы использование методов машинного обучения, в частности нейронных сетей, открыло новые возможности для мониторинга и диагностики электрических машин. Традиционные подходы, основанные на анализе физических параметров, таких как токи, напряжения и температуры, часто оказываются ограниченными в условиях сложных и динамически меняющихся нагрузок. Нейронные сети способны учитывать нелинейные взаимосвязи между параметрами, адаптироваться к изменениям условий эксплуатации и выявлять скрытые закономерности в сигналах, что делает их незаменимыми для задач прогнозирования и оптимизации.

Особую роль в данном направлении играют сверточные нейронные сети (Convolutional Neural Networks, CNN). Изначально разработанные для обработки изображений, они оказались эффективными для анализа временных рядов, таких как сигналы токов, напряжений и температур, поступающих от электрической машины. CNN позволяют:

- Автоматически выделять характерные признаки в данных без необходимости предварительного ручного проектирования фильтров;
- Классифицировать режимы работы машины (например, запуск, останов, перегрузка) с высокой точностью;
- Выявлять аномалии, свидетельствующие о возможных неисправностях;

- Прогнозировать оптимальные параметры управления, что улучшает производительность и продлевает срок службы оборудования.

Необходимое для исследования оборудование:

1. Драйвер В-G431В-ESC1. Основные преимущества в рамках работы:

- Оптимизированный драйвер для управления бесщеточными (BLDC) и синхронными с постоянными магнитами (PMSM) моторами;

- 3-фазная плата драйвера с MOSFET транзисторами (60 В, 120 А);

- Высокая вычислительная мощность и функции обработки сигналов;

- Поддержка датчиков положения ротора (датчики Холла или энкодер);

- Совместимость с интерфейсами PWM, CAN, UART;

- 3 токовых шунта и возможность измерения температуры обмоток мотора.

2. Бесщеточный трехфазный двигатель FL86BLS, имеющий особенности:

- 4 пары полюсов;

- Датчики Холла для определения положения ротора;

- Номинал частоты вращения – 3000 об/мин;

- Номинал напряжения питания – 48 В;

- Номинальный момент – 1,05 Н*м;

- Номинальная нагрузка – 330 Вт.

3. Преобразователь интерфейса UART/RS-485;

4. ПК.

5. Осциллограф Rodhe&Schwarz RTH1004, имеющий параметры:

- 4 изолированных канала;

- полоса пропускания от 60 до 500 МГц;

- частота дискретизации до 5 Гвыборков/сек;

- разрешение АЦП – 10 бит.

6. Термопара К-типа.

Драйвер В-G431В-ESC1 используется для управления FL86BLS в различных режимах: запуск, останов, работа на номинальную нагрузку, 10% - перегрузка. Наряду с осциллографом драйвер используется для сбора данных о работе электрической машины, список которых приведен в таблице 1.

Таблица 1

Данные для обучения модели

Тип данных	Формат данных	Источник данных
1	2	3
Линейное напряжение АВ	Изображение	Осциллограф
Линейное напряжение ВС		
Линейное напряжение СА		
Сигнал управления ШИМ		
Ток фазы А	Временные ряды	Драйвер
Ток фазы В		
Ток фазы С		
Температура окружающей среды		
Температура обмотки		
Данные об ошибках драйвера	Бинарные индикаторы	

Полученные данные через преобразователь интерфейса пересылаются на ПК и сортируются по режимам работы электрической машины.

В рамках оценки работоспособности указанного способа мониторинга и оптимизации параметров работы ЭМ минимальное количество осциллограмм по каждому режиму должно составлять не менее 500 шт.

Предварительная обработка данных и обучение модели:

Эффективность работы любой нейронной сети напрямую зависит от качества входных данных, чему может поспособствовать их предварительная обработка [1].

К методам обработки входных данных можно отнести:

- Нормализация данных – преобразование данных к некоторому единому виду (например, диапазону значений $[0, 1]$, $[-1, 1]$ [2];

- Стандартизация данных – процесс приведения признаков к нулевому среднему и стандартному отклонению, равному единице. Позволяет сопоставить данные из различных источников по масштабу [3]

- Аугментация данных – искусственное увеличение объема данных для обучения путем модификации уже существующих данных. К модификации может относиться наложение различных фильтров (в случае с изображениями), добавление шумов, вращение, масштабирование, зеркальное представление изображения.

- Фильтрация – применение различных цифровых фильтров, аппаратно не реализованных, для удаления шумов.

- Преобразование одного типа данных в другой. В контексте данной задачи – преобразование временных рядов в осциллограммы.

- Разделение выборки данных на обучающую, тестовую и валидационную и прочие методы.

В основу обучающих данных модели лягут осциллограммы токов, напряжений, управляющих сигналов инвертором, согласно рисунку 1. По этой причине одним из шагов предварительной обработки данных будет являться преобразование временных рядов токов фаз в изображения.

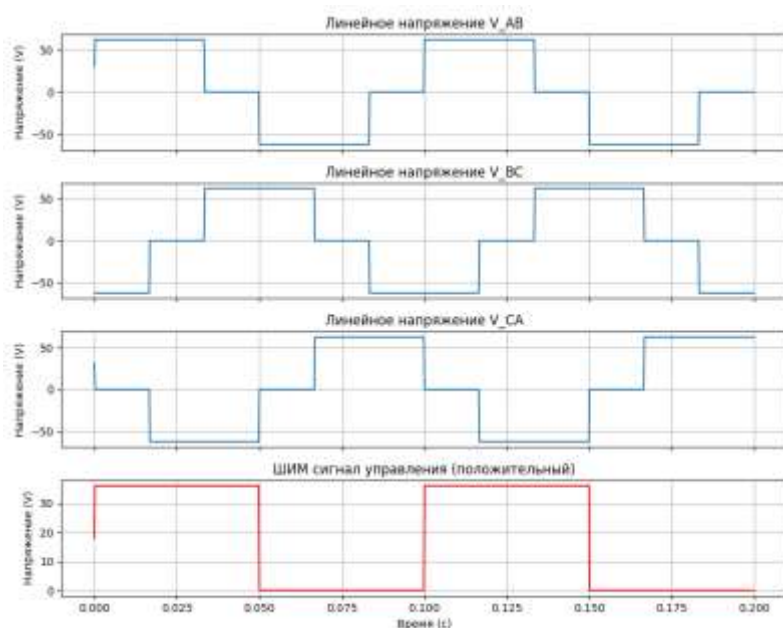


Рис. 1. Вид осциллограмм

Для интерпретации полученных из изображений зависимостей, графических особенностей и повышения точности модели кроме осциллограмм в обучении модели будут участвовать временные ряды, указанные в таблице 1, однако для анализа подобных данных кроме CNN будет привлечен MLP (многослойный персептрон, от англ. Multi-Layer Perceptron), который наиболее хорошо работает с данными табличного типа, либо временными рядами.

Таким образом, при выполнении одного включения электрической машины в одном режиме, допустим, режиме запуска ЭМ, будут записаны данные для обучения в виде пяти компонент:

- Одно изображение, содержащее четыре осциллограммы (линейные напряжения АВ, ВС, СА и сигнал управления ШИМ);
- Одно изображение, содержащее три графика фазных токов;
- Два временных ряда: температура обмотки, температура окружающей среды;
- Один ряд бинарных индикаторов возможных ошибок драйвера.

Таким образом, архитектура будет иметь вид, показанный на рисунке 2.

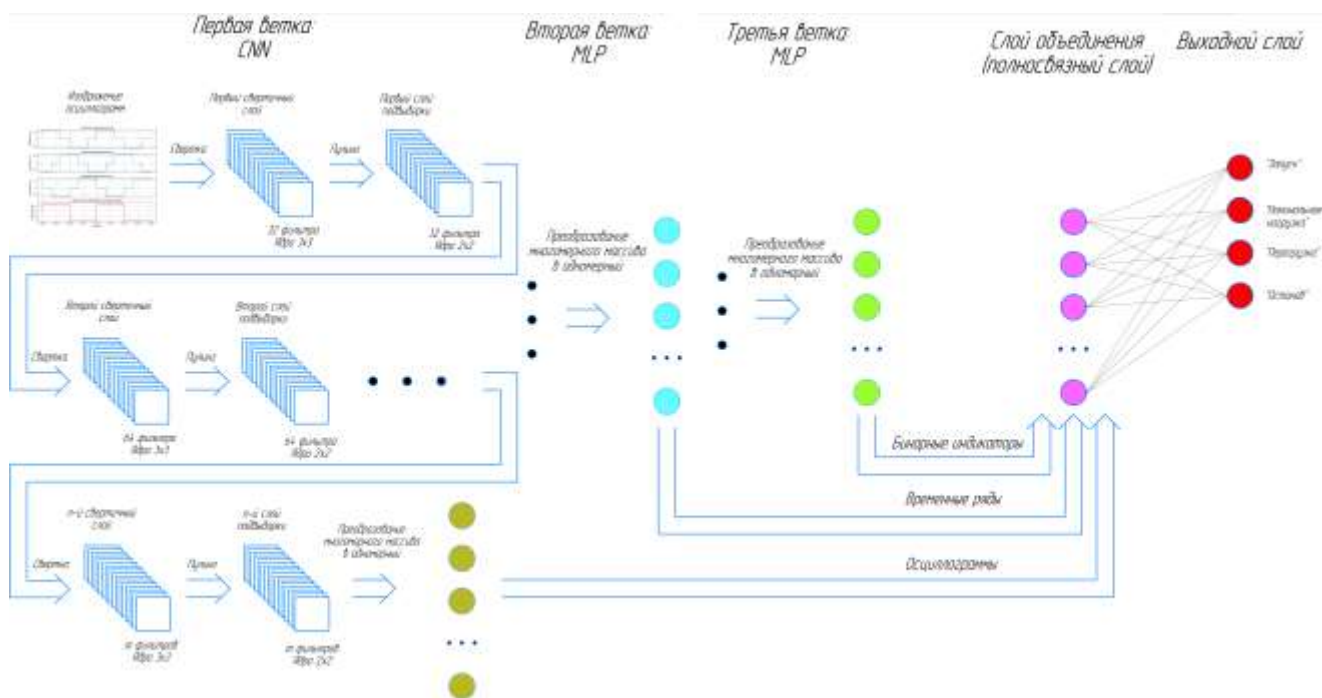


Рис. 2. Архитектура модели

Сама по себе модель является классификатором, которая по предоставленной на входе информации может определить один из ранее перечисленных режимов работы электрической машины (запуск, номинальная нагрузка, перегрузка, останов) с точностью, определяемой качеством и достаточностью обучающей выборки.

С целью повышения функционала данной модели планируется, после определения режима работы, внедрение возможности оптимизации параметров управления электрической машины под конкретный режим. Также, в случае высокой оценки результативности модели – внедрение ее для мониторинга и управления ЭМ в режиме реального времени.

В данном исследовании оптимизация параметров управления планируется осуществляться за счет обучения с подкреплением (Reinforcement learning, RL), что в простейшем случае представляет собой вознаграждение за правильно выполненное действие, как лакомство для собаки за выполненную команду хозяина. Только на уровне нейронных сетей в качестве лакомства выступают численные вознаграждения [4], то есть максимизация или минимизация целевой функции.

В качестве целевой функции может быть выбрана максимизация КПД ЭМ, ее стабильность или же минимизация потерь или перегрева. Кроме того, целевая функция может быть комбинированной и содержать все вышеперечисленные компоненты с присвоенными им приоритетами, например, КПД = 0,2; Потери = 0,3; Перегрев = 0,1; Стабильность = 0,4, где у минимизации перегрева низший приоритет, а у максимизации стабильности работы – высший.

Целевая функция может иметь вид:

1. Минимизация потерь:
- 2.

$$J(x) = I^2 R + kT.$$

3. Максимизация стабильности работы:

$$J(x) = \text{Var}(V_{out}),$$

где Var – дисперсия выходного напряжения.

Кроме того, для системы следует указать параметры, которые она может оптимизировать, а также их граничные значения для минимизации риска выхода из строя оборудования из-за неверной интерпретации нейронной сетью реальной ситуации, что вполне возможно при недостаточном обучении или ошибках со стороны разработчика при ее конфигурировании.

Мониторинг в режиме реального времени:

Последним этапом исследования служит применение созданной системы классификатора режимов работы и оптимизации параметров электрической машины в режиме реального времени, что будет являться интеллектуальной системой мониторинга, которая не только сможет выделять наличие отклонений в работе электрической машины, но и корректировать ее управление для повышения эффективности.

Поскольку управление электрической машины осуществляется через драйвер В-G431В-ESC1, то для применения оптимизированных параметров нейронной сетью необходимо настроить интерфейс между программным обеспечением (ПО) драйвера и средой программирования, в данном случае Python. Наиболее простым способом является использование официального ПО – STM32CubeIDE по существующей инструкции [5].

Для получения осциллограмм в режиме реального времени можно воспользоваться LAN-интерфейсом для удаленной работы Rodhe&Schwarz или настроить нейронную сеть на считывания данных с Web-интерфейса.

В ходе исследования рассмотрены возможности сверточной нейронной сети по поступающим осциллограммам и числовым данным с системы управления и электрической машины определять ее режим работы, а также оптимизировать параметры данного режима с достижением установленных приоритетов пользователем.

Кроме того, рассмотрена возможность применения данной системы в режиме реального времени после ее качественного обучения, что позволит на основе мониторинга за системой, состоящей из электрической машины и драйвера, а также получения сигналов обратной связи, повысить эффективность работы, повысить срок службы системы, снизить риск возникновения неполадок.

Библиографический список

1. Шапошникова, Н.В. Исследование влияния предварительной обработки данных и параметров настройки нейронной сети на эффективность ее работы / Н. В. Шапошникова, Я. С. Ганжа // Решетневские чтения : электронный журнал. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-vliyaniya-predvaritelnoy-obrabotki-dannyh-i-parametrov-nastroyki-neyronnoy-seti-na-effektivnost-ee-raboty>. – Дата публикации: 2018
2. Умная нормализация данных // How to become an author : сайт. – URL: <https://habr.com/en/articles/527334/> (дата обращения: 24.11.2024)
3. Предварительная обработка данных в машинном обучении: инструкция, инструменты, полезные ресурсы для начинающих // How to become an author : сайт. – URL: <https://habr.com/ru/companies/skillfactory/articles/848858/> (дата обращения: 24.11.2024)
4. Обучение с подкреплением: неформальное знакомство // How to become an author: сайт. – URL: <https://habr.com/ru/companies/wunderfund/articles/667654/> (дата обращения: 24.11.2024)
5. Eirbot B-G431B-ESC1 guide for brushless motors // github: сайт. – URL: <https://github.com/eirbot/eirbot-B-G431B-ESC1-guide> (дата обращения: 24.11.2024)

© Татауров А.И., 2024

Т.И. ХИЛАЖЕВ

Timur.khilazhev99@mail.com

Науч. руковод. – д-р техн. наук, профессор **В.Е. ВАВИЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

БЛОКЧЕЙН И РЗА: УСТРАНЕНИЕ УЯЗВИМОСТЕЙ И ГАРАНТИИ БЕЗОПАСНОСТИ

Аннотация: большой прирост сложности топологии и цифровизации электроэнергетических сетей требуют повышения безопасности и прозрачности систем релейной защиты, которое имеет решающее значение для обнаружения неисправностей и надежности системы. Используя децентрализованную, неизменяемую и прозрачную природу блокчейна, предлагаемый в статье подход повышает целостность данных, усиливает меры кибербезопасности и обеспечивает децентрализованный контроль над операциями ретрансляции. Кроме того, блокчейн облегчает мониторинг в реальном времени и создает комплексные контрольные журналы, тем самым улучшая сотрудничество между заинтересованными сторонами. Тем не менее внедрение блокчейна сопряжено с такими проблемами, как интеграция с существующими системами и масштабируемость, его потенциал для преобразования систем релейной защиты в более безопасные и прозрачные структуры значителен. Это исследование подчеркивает важность внедрения инновационных технологий, таких как блокчейн, для обеспечения устойчивости и безопасности современных электрических сетей.

Ключевые слова: блокчейн, кибербезопасность, релейная защита.

Современные энергетические системы во многом зависят от надежности систем релейной защиты, которые играют важную роль в обеспечении безопасного функционирования электросетей. Эти системы выявляют отклонения от нормы, например, короткие замыкания или другие виды неисправностей, и оперативно реагируют на них, изолируя поврежденные участки. Однако традиционные релейные системы зачастую страдают недостаточной защитой данных и слабой безопасностью связи, что делает их подверженными киберугрозам и сбоям в работе.

Блокчейн представляет собой технологию распределенных реестров, обеспечивающую надежную защиту данных благодаря своей децентрализованной природе. В блокчейне каждая операция фиксируется в виде блока, который связан с предыдущими блоками, образуя неразрывную цепь записей. Такая архитектура исключает возможность изменения данных без согласования всех участников сети, что значительно повышает безопасность системы.

Повышение безопасности с помощью блокчейна.

Блокчейн может гарантировать, что все операционные данные, связанные с защитой реле, такие как журналы неисправностей и настройки реле, надежно записаны в неизменяемом реестре. Это предотвращает несанкционированные изменения и повышает доверие к данным, используемым для принятия операционных решений. К примеру, любые изменения, внесенные в настройки реле, могут быть зарегистрированы в блокчейне, что позволяет проводить проверку по предыдущим конфигурациям. С ростом подключенности сетевых устройств риски кибербезопасности возросли.

Технология блокчейн способна усилить безопасность за счет применения криптографических методов для защиты каналов связи между реле и диспетчерскими центрами. Это достигается через шифрование передаваемых данных и использование протоколов аутентификации, которые обеспечивают проверку подлинности устройств в сети. Кроме того, блокчейн предоставляет возможности для децентрализации управления системами релейной защиты [1]. В такой среде решение об отключении аварийных участков может приниматься коллективно несколькими узлами (реле), что уменьшает вероятность отказов, характерных для традиционных централизованных систем.

Повышение прозрачности с помощью блокчейна.

Технология блокчейн позволяет осуществлять непрерывный мониторинг работы реле в режиме реального времени, фиксируя операционные данные в блокчейне. Такой подход дает возможность всем участникам системы иметь доступ к актуальным и последовательным данным о текущем состоянии сети, что способствует улучшению процессов принятия решений и оперативному реагированию на возможные инциденты [2].

Разрабатываемые адаптивные решения для релейной защиты смогут динамически реагировать на изменения в производстве энергии и обеспечивать безопасность системы. Исследования также охватывают интеграцию систем хранения энергии и анализ качества электроэнергии. Адаптивные решения включают в себя разработку алгоритмов, которые могут изменять уставки релейной защиты в реальном времени в зависимости от условий производства энергии, а интеграция систем хранения энергии обеспечивает стабильность системы в условиях переменного производства. Неизменяемая природа блокчейна создает комплексные аудиторские следы для всех действий, предпринимаемых в системе релейной защиты. Эта функция имеет решающее значение для соответствия нормативным требованиям и может помочь организациям продемонстрировать соблюдение стандартов безопасности. В случае инцидента заинтересованные стороны могут отследить его с помощью блокчейна, чтобы определить действия, приведшие к событию. Помимо всего этого блокчейн способствует улучшению сотрудничества между различными субъектами, участвующими в управлении энергосистемой, такими как коммунальные компании, регулирующие органы и поставщики услуг по техническому обслуживанию, предоставляя общую платформу для доступа к данным, связанным с работой реле. Такая коллективная видимость поощряет проактивные стратегии обслуживания, основанные на общих знаниях.

Проблемы внедрения.

Преимущества интеграции блокчейна в системы релейной защиты значительны, но необходимо решить ряд проблем:

Переход от традиционных релейных систем к решениям на основе блокчейна требует тщательного планирования, чтобы обеспечить совместимость с существующей инфраструктурой без нарушения работы. По мере увеличения количества реле в электросети обеспечение эффективной обработки больших объемов транзакций блокчейном остается технической проблемой. Внедрение технологии блокчейн может столкнуться с нормативными препятствиями, поскольку стандарты ее использования в критически важной инфраструктуре продолжают развиваться [3].

В результате исследования мы можем описать протекание процессов от сбора информации с измерительных приборов до примеров использования реестра данных блокчейн.

Устройствах РЗА (реле, измерительные приборы) собирают информацию о токе, напряжении, частоте, срабатываниях реле, времени срабатывания и других параметрах работы электроэнергетической системы. Данные собираются в стандартных форматах, например: Modbus, DNP3 и др. Далее специальный модуль (программное обеспечение) считывает данные от устройств РЗА через выбранный протокол связи. Данные могут быть обработаны для преобразования в нужный формат или агрегированы для удобства хранения [4].

Следующий этап связан с преобразованием данных о работе РЗА в формат, подходящий для записи в блокчейн (например, JSON, XML и др.). Специальный код (написанный на языке программирования блокчейна, например, Solidity, Simplicity, CX для Ethereum) определяет правила записи данных, доступ к данным и аудит. Смарт-контракт выполняет транзакцию, записывая данные в блокчейн формируя неизменяемую запись о работе РЗА.

Для доступа к данным требуется авторизация пользователей. Специальный интерфейс предоставляет доступ к данным, хранящимся в блокчейне, для анализа, мониторинга и аудита работы системы. Использование криптографических методов для верификации и подтверждения аутентичности данных в блоке.

Все действия по записи данных, аудиту и доступу к данным записываются в блокчейне, обеспечивая полную прозрачность работы системы. Что исключает возможность подделки или изменения данных, так как блокчейн неизменяем. Благодаря децентрализованной архитектуре и криптографическим методам защиты реестр данных становится устойчив к кибератакам. Все это напрямую повышает доверие к данным о работе системы РЗА, поскольку они записаны в неизменяемом режиме [5].

Примеры использования:

- Просмотр истории работы системы, анализ срабатываний реле, выявление потенциальных проблем.
- Изучение данных о работе системы в момент аварии для определения причин и улучшения работы системы РЗА.
- Проведение аудита работы системы РЗА для подтверждения ее правильной функциональности и безопасности.

- Использование неизменяемого архива данных в блоке для снижения рисков ошибок в работе системы РЗА и повышения надежности энергосистемы.

Внедрение технологии блокчейн в системы релейной защиты (РЗА) обеспечивает существенные улучшения как в плане безопасности, так и в плане прозрачности. Блокчейн способствует обеспечению целостности данных, усиливает меры кибербезопасности, предоставляет децентрализованный контроль, а также возможности мониторинга в реальном времени и создания неизменяемых записей, что способно значительно повысить надежность электросетей. Кроме того, обширные базы данных, формируемые в процессе работы систем РЗА, могут служить основой для применения методов машинного обучения в анализе реакции реле на изменения параметров в энергетической системе. В условиях растущей цифровизации отрасли внедрение таких инновационных технологий становится ключевым фактором для обеспечения безопасных и эффективных систем электроснабжения.

Библиографический список

1. Агарвал, С. и Коул, С. Влияние технологии блокчейн на «ретрансляционную сеть». URL – <https://pure.jgu.edu.in/id/eprint/2437/> (дата обращения 15.11.2024 г.).

2. Blockchain technology puts paid to US energy data attacks. URL – <https://technologymagazine.com/articles/blockchain-technology-puts-paid-to-us-energy-data-attacks>. (дата обращения 15.11.2024 г.).

3. MDPI. Применение технологии блокчейн в современных энергосистемах. URL – <https://www.mdpi.com/1996-1073/15/13/4516>. (дата обращения 15.11.2024 г.).

4. Smart Energy. Применение технологии блокчейн в электроэнергетических системах. URL – <https://www.smart-energy.com/policy-regulation/applying-blockchain-technology-electric-power-systems/>. (дата обращения 15.11.2024 г.).

5. Energy Web Foundation. URL – https://blockchain-observatory.ec.europa.eu/document/download/4ce6b8bf-8f22-4eef-acdc-99da056aeed8_en?filename=EUBOF-Thematic_Report_Energy_Sector_0.pdf&prefLang=et (дата обращения 15.11.2024 г.).

© Хилажев Т.И., 2024

Ш.Н. ШАРАФУТДИНОВ, Д.Р. ИЛЬЯСОВ

sharafutdinov.shn@ugatu.su, david.ilyasow@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. **И.И. ЯМАЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ ОПОР

Аннотация: данная статья посвящена систематизации и описанию различных типов магнитных опор, используемых в современной технике. В работе представлена подробная классификация, основанная на ключевых параметрах и принципах действия магнитных опор, рассмотрены различные варианты конструкций, области применения и преимущества каждой категории магнитных опор.

Ключевые слова: активный магнитный подвес, магнитный подшипник, цифровой двойник, программно-аппаратное моделирование

Понимание разнообразия магнитных опор является ключевым для правильного выбора оптимального решения для конкретной задачи. В данной статье рассматриваются типы магнитных подвесов и их основные характеристики.



Рис. 1. Классификация магнитных подвесов

Магнитное сопротивление

В случае силы отталкивания описывается среда с постоянной намагниченности $\mu = \mu_r \mu_0$, с относительной проницаемостью μ_r , зависящей от материала. Сила отталкивания определяется энергией, запасенной в магнитном поле, которая преобразуется в механическую энергию. Таким образом, сила отталкивания:

$$f = \partial W / \partial s,$$

где ∂W – изменение энергии поля;

∂s – изменение положения левитирующего тела.

Магнитная сила такого рода появляется на стыке веществ с разной относительной магнитной проницаемостью μ_r , например, железа и воздуха. Чем больше разница в проницаемости, тем больше сила f . Для ферромагнитных материалов с $\mu_r = 1$ силы могут достигать достаточно большой величины, из-за чего они чаще других материалов находят практическое применение в промышленности.

Магнитные опоры можно разделить на пять типов по источнику магнитного эффекта (рис. 1) [1].

Активный магнитный подвес (тип 1)

Основной принцип действия активного магнитного подшипника очень прост. Известно, что металлический предмет притягивается постоянным магнитом или электромагнитом. На рисунке 2 показана схема работы активного магнитного подвеса: металлический предмет будет притягиваться к расположенному рядом с ним электромагниту всякий раз, когда на катушку подается ток. Сила между электромагнитом и металлическим предметом всегда является притягивающей – она не может быть отталкивающей [2].

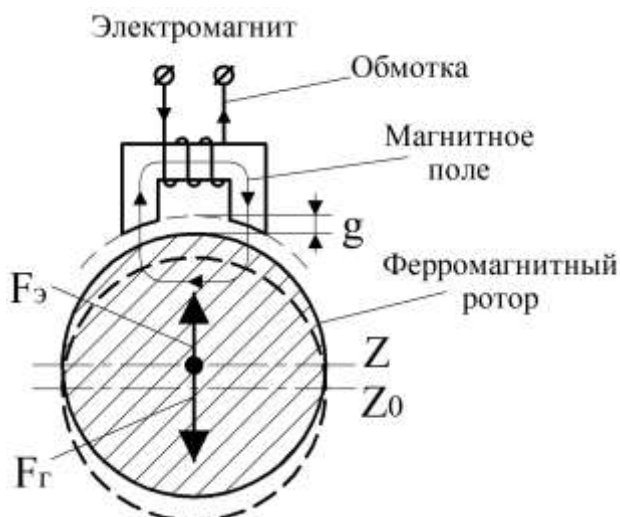


Рис. 2. Принцип действия активного магнитного подвеса

Усилие в АМП зависит от двух составляющих: тока I в обмотках и зазора g между электромагнитом и объектом.

Если ток I постоянный, то сила $F_{ЭМ}$, притягивающая объект к электромагниту, будет увеличиваться по мере приближения ротора к электромагниту. Из-за этого, а также из-за того, что сила тяжести F_G практически не меняется в зависимости от положения ротора, если ротор приблизится к электромагниту достаточно близко, чтобы электромагнитная сила $F_{ЭМ}$, преодолела силу тяжести F_G , ротор перескочит на электромагнит и прилипнет к нему. В обратном случае, при достаточном отдалении ротора от электромагнита, сила тяжести будет больше электромагнитной, из-за чего система потеряет стабильность [3].

Среди причин широкого распространения активного магнитного подвеса на практике можно отметить свободно выбираемые характеристики жесткости и демпфирования, а также свободное позиционирование ротора в воздушном зазоре на базовом уровне. На системном уровне основные преимущества можно свести к следующему: активный подшипник может адаптироваться к условиям эксплуатации и взаимодействовать с окружающей средой.

Электромагнитный подвес с резонансной цепью (тип 2)

Этот тип подшипника (рис. 3) обеспечивает стабильные жесткостные характеристики в LC -контуре, возбуждаемом в небольшом резонансе. LC -контур образован индуктивностью катушки электромагнитного подшипника и конденсатором, а механическое перемещение ротора изменяет индуктивность электромагнита. LC -цепь работает вблизи резонанса и настроена таким образом, что она приближается к резонансу по мере удаления ротора от электромагнита. Это приводит к увеличению тока от источника переменного напряжения и, таким образом, возвращает ротор в его номинальное положение [1].

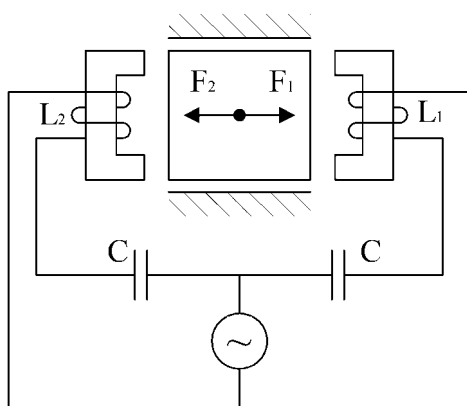


Рис. 3. Электромагнитный резонансный LC подвес

Усилия и жесткость не очень велики, но достаточны для применения в приборостроении. Основным недостатком является отсутствие демпфирования, т.е. без дополнительных мер, таких как механические или активные подшипники, такие системы, как правило, становятся нестабильными.

Пассивный магнитный подвес (тип 3)

Постоянные магниты в стационарной конфигурации не могут стабилизировать положение объекта. Такие подвесы требуют добавления гироскопических сил, как в случае с левитроном, или диамагнитного материала для получения стабильного зависания при малых приложенных усилиях [1, 4].

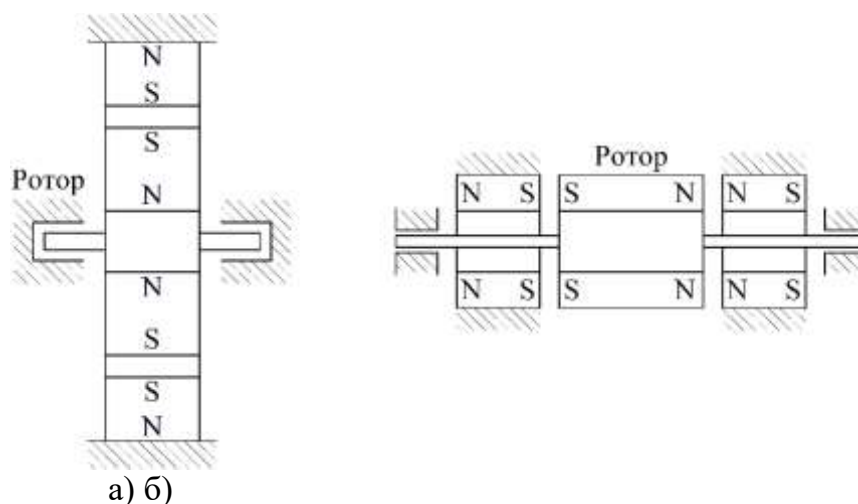


Рис. 4. Пассивный магнитный подвес на постоянных магнитах
а) радиальный; б) осевой

На рис. 4 показаны варианты исполнения магнитных опор на постоянных магнитах. Радиальный пассивный магнитный подвес (рис.4, а) представляет собой радиально намагниченный кольцевой постоянный магнит, жестко закрепленный на роторе, и находящийся внутри неподвижного статора из кольцевого магнита с полярностью, обратной ему. При этом данная магнитная опора неустойчива в осевом направлении. Осевой пассивный магнитный подвес (рис. 4, б) выполняется в виде цилиндрического магнита, закрепленного на роторе, и расположенного между двумя неподвижными магнитами, направленными к нему противоположными полюсами. В радиальном направлении подвес теряет устойчивость.

Сверхпроводящий подвес (тип 4)

Свойство, известное как эффект Мейсснера-Оксенфельда, приводит к возникновению сильных взаимодействий и представляет широкий технический интерес. Суть данного явления заключается в возникновении незатухающего кругового тока в слое, находящемся в слое у самой поверхности сверхпроводника в слабом магнитном поле. Толщина этого слоя имеет порядок 10^{-8} м.

Магнитное поле этого тока компенсирует внутри сверхпроводника внешнее магнитное поле, благодаря чему полное поле внутри проводника становится равным нулю. Сверхпроводник не является идеальным диамагнетиком, так как намагниченность внутри него равна нулю.

Если магнитная индукция вокруг сверхпроводника электрического тока возрастет до критической величины $B_{кр}$, сверхпроводимость исчезнет. $B_{кр}$ уменьшается с увеличением температуры и становится равным нулю при T_K

Температурная зависимость $B_{кр}$ в математическом виде задается параболическим законом:

$$B_{кр} = B_0 [1 - (T/T_K)^2],$$

где B_0 – магнитная индукция критического поля при 0 К.

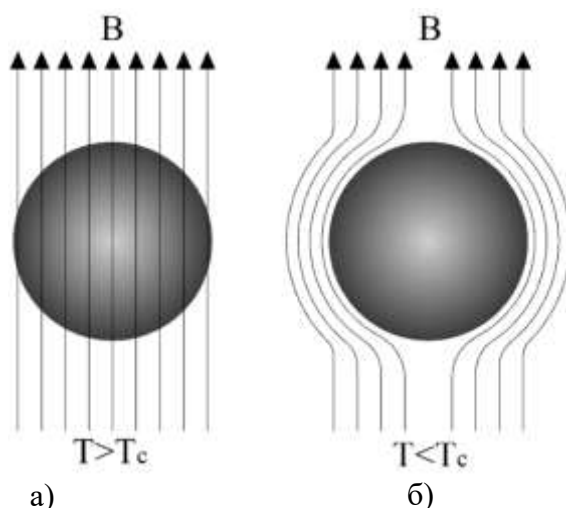


Рис. 5. Эффект Мейсснера-Оксенфельда в сверхпроводящем шаре
 а) нормальное состояние, внешнее поле свободно проникает вглубь металла;
 б) образец охлаждается ниже температуры сверхпроводимости T_c , магнитное поле выталкивается из сверхпроводника

Одним из перспективных направлений применения сверхпроводящего подвеса является создание магнитных систем высокой энергии, таких как ускорители частиц, ядерные реакторы на основе термоядерного синтеза.

Гибридный магнитный подвес (тип 5)

Магнитная опора данного типа состоит из активного магнитного подшипника и пассивного магнитного подвеса. Основное усилие, удерживающее ротор, во взвешенном положении осуществляется постоянными магнитами, а корректировка положения ротора выполняется электромагнитом. Это позволяет уменьшить затраты энергии на работу подшипника.

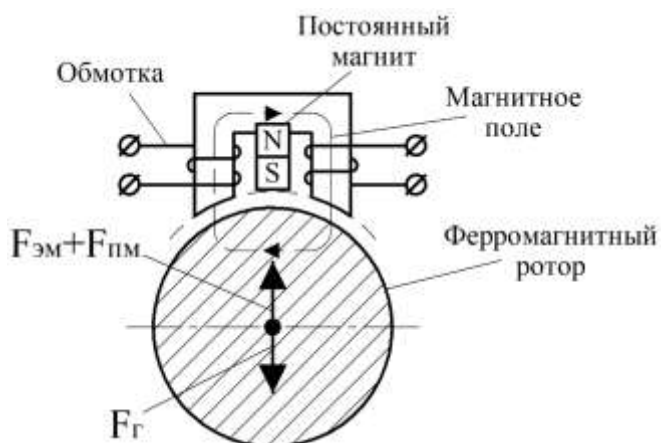


Рис. 6. Гибридный магнитный подшипник

Для работы ГМП требует наличие системы управления, корректирующей положение ротора и рабочий зазор в подшипнике.

Для роторных машин, таких как турбины или генераторы, выбор магнитного подвеса имеет ключевое значение для обеспечения стабильной и эффективной

работы. Рассмотрим сравнение различных типов магнитных подвесов с точки зрения их применимости к крупным роторным машинам.

Таблица 1

Сравнение характеристик магнитных опор

Характеристика	Тип магнитной опоры				
	Активный	LC-подвес	Пассивный	Сверхпроводящий	Гибридный
1	2	3	4	5	6
Применение в крупных роторных агрегатах	да	нет	да	нет	да
Несущая способность, МПа	0,6-1	мала	0,55-0,9	мала	0,73-1
Вспомогательное оборудование	Система управления	нет	нет	нет	Система управления
Подвес при отсутствии электропитания	нет	нет	да	да	да

В заключение, анализ распространенности типов магнитных подшипников в промышленности показывает доминирование активных магнитных подшипников, несмотря на существование пассивных и гибридных вариантов с лучшими характеристиками. Хотя последние два типа применяются, преимущество активных подшипников обусловлено их большей простотой изготовления и обслуживания.

Библиографический список

1. Журавлев Ю.Н. Активные магнитные подшипники: расчет и применение. / Ю.Н. Журавлев. – М: Политехника. – 2003. – 206. с.
2. Исмагилов Ф.Р., Шарафутдинов Ш.Н., Ямалов И.И., Глумов Д.А. Анализ влияния конструкции радиального магнитного подшипника на магнитные характеристики – Электротехника. – 2023. 6 с.
3. Filatov A. General explanation of how magnetic bearings work / A. Filatov, L. Hawkins // Calnetix Technologies. – 2018. – P. 1–16.
4. Поляхов Н.Д. Обзор способов практического применения активных магнитных подшипников / Н.Д. Поляхов, А.Д. Стоцкая // Научное приборостроение. – 2012. – Т. 22, №4. – С. 5–18.
5. Верещагин В.П. Методика проектирования электромагнитных подшипников / В.П. Верещагин, А.В. Рогоза, Т.Н. Савинова // Вопросы электромеханики. – 2009. – Т. 113. 6 с.

© Шарафутдинов Ш.Н., Ильясов Д.Р., 2024

Д.У. СУЛТАНГАРЕЕВ

sultangareev.damir@mail.ru

Науч. руковод. – ассистент кафедры ЭМ А.А. ПОДГУЗОВ

Уфимский университет науки и технологий

ПРИМЕНЕНИЕ СОВРЕМЕННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН В АВИАЦИИ

Аннотация: интегрированные электрические машины (ЭМ) представляют собой перспективное направление в области развития авиационных двигателей (АД). Они объединяют в себе функции стартера, генератора и привода насосов, что позволяет повысить эффективность и надёжность работы двигателя. В данной статье рассматривается применение современных ЭМ на каскаде вала высокого давления (КВД) и каскаде вала низкого давления (КНД), а также в электрических приводах топливных и масляных систем.

Ключевые слова: компрессор высокого давления, компрессор низкого давления, газотурбинный двигатель, электрификация авиационного двигателя, более электрический самолет, электрические машины, электрические привода, стартер-генератор, электрический генератор.

В области авиации достигнут тот этап развития, когда традиционные методы конструирования воздушных судов более не способны обеспечить повышение их эффективности, снижение уровня загрязнения окружающей среды и шумового воздействия [1]. Одним из вариантов повышения данных показателей является создание «более электрического самолета». Но переход от традиционного метода разработки воздушного судна к полностью электрическому занимает довольно-таки долгое время и на данный момент стремительно развивается концепция «электрифицированный авиационный двигатель» [2].

В более электрических самолетах значительное снижение веса может быть достигнуто путем замены различных традиционных систем питания одной электрической системой, подающей питание на различные электрические исполнительные элементы. Однако это усовершенствование требует более высокой выработки электроэнергии на воздушном судне.

АД имеет ЭМ, соединенную с валом компрессора низкого и/или высокого давления, при этом ЭМ работает в различных условиях эксплуатации (температура окружающей среды). В режиме генерации электрической энергии используется режим переменной скорости, так как скорость вращения ЭМ напрямую зависит от скорости вращения вала КНД и КВД [3]. Выходное напряжение стабилизируется благодаря блоку электроники. При использовании данного типа ЭМ исключается использование коробки приводов и, таким образом, может быть достигнуто дальнейшее снижение как веса, так и стоимости. Кроме того, вес жгута проводов системы распределения энергии может быть уменьшен, так как для передачи той

самой энергии необходимо всего два кабеля, особенно это касается коммерческих самолетах, в которых расстояние для передачи мощности очень велико [3].

Процесс электрификации авиационного двигателя можно разделить на два основных этапа [4]:

1. Интеграция электромагнитных компонентов в конструкцию двигателя, включающая использование интегрированных стартер-генераторов (СТГ) и интегрированных генераторов (ЭГ);

2. Электрификация систем, связанных с обслуживанием масла, топлива и кондиционирования воздуха.

ЭГ, размещённый на валу КНД, функционирует исключительно в режиме генератора и не способен инициировать запуск газотурбинного двигателя (ГТД). Тем не менее, наличие дополнительного источника электроэнергии, несомненно, будет способствовать повышению эффективности всей авиационной системы.

Одновременно с этим интегрированный и высокоэффективный СТГ, установленный на валу КВД, играет ключевую роль в запуске авиационного двигателя до минимально возможной скорости вращения. Он также обеспечивает постоянное производство электроэнергии в диапазоне частот от минимальной до 15 000 оборотов в минуту и может временно увеличивать мощность при необходимости.

Использование интегрированной электрической машины (ЭМ) способствует увеличению топливной эффективности авиационного двигателя (АД), а также снижению массы и улучшению аэродинамических характеристик. Это достигается благодаря исключению коробки агрегатов и уменьшению размеров мотогондолы. Кроме того, применение ЭМ способствует повышению экологичности АД, так как позволяет осуществлять прямой электрозапуск турбины.

Всё это способствует практической реализации концепции электрического авиационного двигателя. [4].

Хотя у интегрированных электромеханических систем есть много преимуществ, нельзя не учитывать, что их интеграция с двигателями может привести к проблемам.

При объединении электромеханического модуля с двигателем они образуют цельную неразделимую систему. Это сопряжено с важными вопросами, такими как:

1. согласованное функционирование двигателя и электромеханического модуля, включая анализ динамических характеристик ротора;

2. мониторинг температурных режимов встроенных электромеханических систем;

3. обеспечение надежности таких систем.

Из этого следует вывод о необходимости тесного взаимодействия специалистов по проектированию двигателей и инженерному обеспечению электромеханических систем при разработке подобных комплексных решений [4].

Изучение современной научно-технической литературы показывает, что интегрированные электромеханические системы разнообразны по назначению: на валу КВД устанавливаются современные стартер-генераторы (СТГ), тогда как на валу компрессора низкого давления (КНД) эффективно работают

электрогенераторы (ЭГ). Такое распределение позволяет обеспечить оптимальные условия для запуска двигателя и выработки требуемой электроэнергии, что жизненно важно для полноценной работы самолета.

Конструкция интегрированной ЭМ на вал АД может быть выполнена как с внешним ротором, так и с внутренним. Как правило, для достижения заданных характеристик ЭМ в их конструкции используют редкоземельные постоянные магниты самарий-кобальт (SmCo), которые являются наиболее стойкими в условиях эксплуатации в среде с повышенной температурой, в отличие от магнитов неодим-железо-бор (NdFeB) [4]. На рисунке 1 представлен возможный вариант интеграции ЭМ в АД [3].

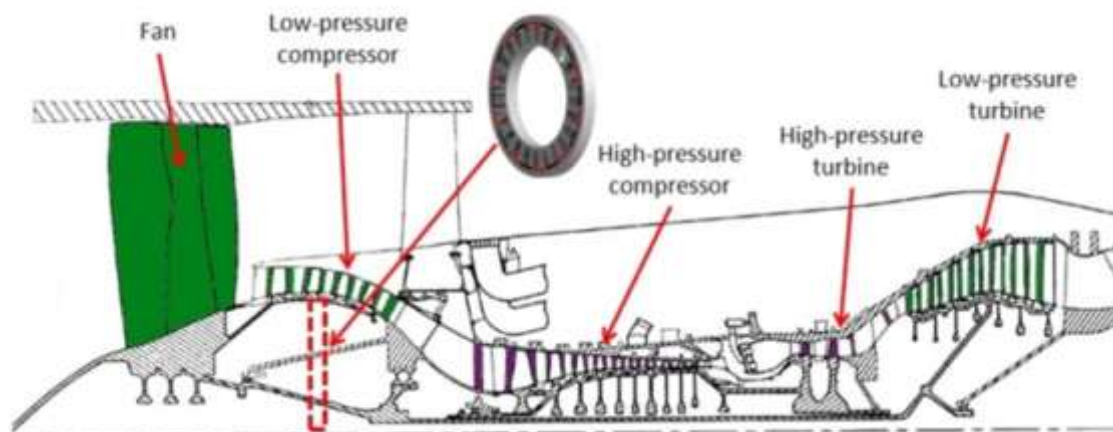


Рис. 1. Возможная схема установки интегрированной ЭМ в АД.

Электрификация АД – ключевая цель, которую ставит перед собой авиационная индустрия и которая определяет будущее авиации. В дополнение к интеграции в АД СТГ и ЭГ, существует процесс электрификации неэлектрических систем. Эти системы можно разделить на три категории: масляные, топливные и системы кондиционирования воздуха.

Рассмотрим процесс перехода к электрическим масляным системам более подробно. В традиционных авиационных двигателях задействован привод масляного насоса через вспомогательный редуктор со строго определенной скоростью вращения синхронно с двигателем [3]. Однако такая схема рискует перегрузить систему избыточной подачей масла, повышая вероятность утечек из системы. Переход к концепции электризованных насосов решает эту проблему за счет гибкости адаптации к изменениям эксплуатационных условий.

Топливная система. В стандартном АД система подачи топлива способна перекачивать гораздо больший объем горючего, чем требуется. Чтобы предотвратить переполнение, в системе предусмотрен специальный клапан, который регулирует поток топлива. Избытки топлива во время работы возвращаются в топливный бак, что снижает общую эффективность подачи топлива и требует дальнейших улучшений конструкции системы. На рисунке 2 представлена схема электрической подачи топлива в двигатель [4].

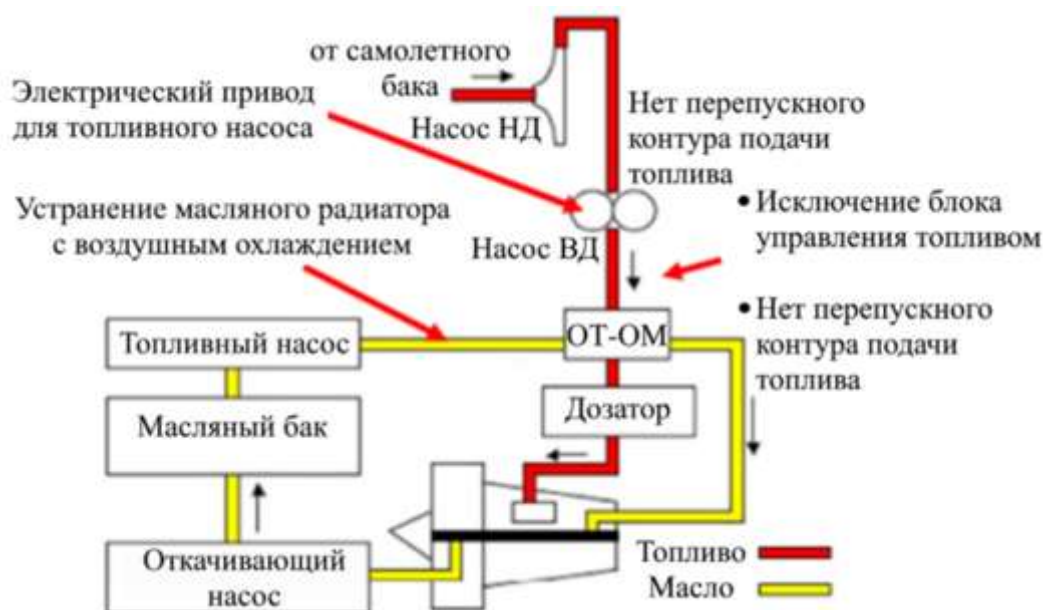


Рис. 2. Система электрической подачи топлива в АД.

Применение электромеханических агрегатов в топливной системе может быть одним из способов решения проблемы. Благодаря гибкому управлению электрическим двигателем, производительность насоса будет оптимизирована, что позволит обеспечить необходимое количество топлива без избытка.

Электрификация кондиционирования воздуха представляет собой прогрессивную технологию, заслуживающую внимания, рассматриваемую для дополнения основных методов электрификации авиационных механизмов. Замена привычных кондиционеров позволит уменьшить расход горючего и упростит конструкцию благодаря исключению воздухопроводящих трубопроводов из состава двигателя. Этот шаг должен повысить энергетическую эффективность всей системы и стабилизировать надежность ее компонентов [4].

В настоящей статье проведен обзор научно-технической литературы, в которых описывается концепция создания электрифицированного АД и электрификация неэлектрических систем. Важно отметить, что в ближайшем будущем станет возможным создание электрифицированных авиационных двигателей, которые будут работать на основе интегрированных электромеханических систем. Это, в свою очередь, приведет к снижению вредных выбросов летательных аппаратов, уровня шума и эксплуатационных расходов.

Концепция разработки такого двигателя представляет собой многообещающее направление, которое объединяет современные достижения в области электромашиностроения и авиастроения.

Библиографический список

1. Новые возможности самолетов на электрической тяге Халютин С.П., Халютина О.С. // cyberleninka URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/novye-vozmozhnosti-samolyotov-na-elektricheskoy-tyage/viewer> (дата обращения: 17.11.2024).

2. Концепция создания электрифицированного авиационного двигателя Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Уразбахтин Р.Р., Старков Р.С. // Вестник УГАТУ URL: <http://journal.ugatu.su/index.php/Vestnik/article/view/3067/2691> (дата обращения: 15.11.2024).

3. Six-Phase Electrically Excited Synchronous Generator for More Electric Aircraft Dieter Gerling, Mohammed Alnajjar // IEEEExplore URL: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7525938> (дата обращения: 29.10.2024).

4. Обзор критических технологий создания электрифицированного авиационного двигателя Лисовин И.Г., Исмагилов Ф.Р., Вавилов В.Е., Дадоян Р.Г., Пронин Е.А. // eLibrary URL: <https://www.elibrary.ru/item.asp?id=49767627> (дата обращения: 28.10.2024).

© Султангареев Д.У., 2024

УДК 53.072.13

Н.Р. МУХАМАТУЛИН, Э.Д. ШАРАФУТДИНОВ, В.А. КОЗЛОВ
tamada210@gmail.com

Научный руководитель – д-р техн. наук, профессор **В.Е. ВАВИЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ДВИГАТЕЛЯ ФАРАДЕЯ

Аннотация: в данной статье рассматривается принцип действия и конструктивные особенности двигателя Фарадея — устройства, использующего электромагнитную индукцию для преобразования электрической энергии в механическую.

Ключевые слова: электродвигатель, двигатель Фарадея, экспериментальная установка.

Электродвигатель Фарадея является самой простой формой электродвигателя, который был создан Майклом Фарадеем в 1821 году. Этот прибор стал первой практической демонстрацией того, как электрические и магнитные поля взаимодействуют для преобразования электрической энергии в механическое движение. Принцип работы электродвигателя Фарадея является основой современных электродвигателей и наглядно иллюстрирует основные законы электромагнетизма.

Основная цель данной статьи — проанализировать принцип работы электродвигателя Фарадея, описать его конструктивные особенности и представить экспериментальные методы, используемые для изучения этого явления.

Принцип работы

Принцип функционирования электродвигателя Фарадея базируется на законе Ампера, который объясняет, какие силы воздействуют на проводник, по которому

течет электрический ток, находящийся в магнитном поле. Электромагнитная сила, которую также называют силой Лоренца, действует под углом 90 градусов как к направлению тока в проводнике, так и к линиям магнитного поля. Именно эта сила и вызывает движение проводника.

Особенности электродвигателя Фарадея:

- Это самый простой электродвигатель, демонстрирующий основные принципы электромагнетизма.

- Его уникальность заключается в том, что он работает с жидкостью (электролитом) как частью конструкции.

- Демонстрирует прямую связь между током, магнитным полем и механическим движением.

Устройство электродвигателя Фарадея

Электродвигатель Фарадея состоит из следующих компонентов:

1. Проводник: Обычно это металлический стержень или проволока, по которой проходит электрический ток.

2. Постоянный магнит: Создает магнитное поле.

3. Источник тока: Подключается к проводнику для создания электрического тока.

4. Контейнер с электролитом (при необходимости): Может использоваться для улучшения контакта проводника с источником тока.

В классическом опыте проводник размещается вблизи магнита таким образом, чтобы он мог свободно вращаться. При включении тока взаимодействие магнитного поля и электрического тока создает вращательный момент, заставляя проводник двигаться.

Экспериментальное изучение

Материалы и оборудование

Для проведения эксперимента потребуется:

Постоянный магнит (сильный неодимовый магнит);

Медная проволока;

Источник постоянного тока (например, батарея);

Контейнер с электролитом (если используется жидкостная модель);

Крепления для фиксации проводника и магнита.

Результат показан на рис. 1.

В данном эксперименте в качестве основы была использована пластиковая бутылка. Через крышку мы провели медный кабель, который выполняет функцию отрицательного вывода (—), соединенного с алюминиевой проволокой, служащей поплавком. Этот поплавок замыкает электрическую цепь при погружении в жидкость.

На дне бутылки горизонтально закреплен магнит цилиндрической формы на фиксированной поверхности. В качестве электролита использована солёная вода, в которую помещён другой медный провод, играющий роль положительного вывода (++)).

Далее один конец медной проволоки подключён к положительному полюсу источника тока. Другой конец проволоки закреплён вблизи магнита, при этом обеспечена возможность её свободного движения.

При замыкании цепи наблюдается движение проволоки под воздействием силы Лоренца, которая возникает в результате взаимодействия магнитного поля и электрического тока.



Рис. 1. Макет электродвигателя Фарадея.

Наблюдения

Когда ток проходит через проводник, он начинает двигаться в направлении, определяемом правилом левой руки Флеминга (или правилом Лоренца). При изменении полярности тока направление движения проводника также меняется.

Теоретическое обоснование

Работа электродвигателя Фарадея объясняется взаимодействием электрического тока и магнитного поля. Магнитная индукция (B) и ток (I) создают силу Лоренца, которая равна:

$$F = I * L * B * \sin(\theta),$$

где: F – сила;

I – сила тока;

L – длина проводника в магнитном поле;

B – магнитная индукция;

θ – угол между током и магнитном полем.

Если угол $\theta = 90^\circ$, сила Лоренца достигает максимального значения. Это приводит к вращению проводника.

Историческая значимость

Эксперимент Фарадея стал основой для дальнейшего развития электромеханики. Его исследования привели к созданию современных электрических двигателей, генераторов и трансформаторов. Кроме того, они стали одним из первых подтверждений связи электричества и магнетизма.

Заключение

Электродвигатель Фарадея – это не только исторически важное изобретение, но и простой и наглядный способ изучения фундаментальных принципов электромагнетизма. Изучение этого устройства позволяет лучше понять взаимодействие электрического и магнитного полей, а также их практическое применение.

Библиографический список

1. Басаргин, А.А. Методы искусственного интеллекта: учебное пособие/ А.А. Басаргин. – Новосибирск: СГУГиТ. – 2022. – 164 с.
2. Faraday, M. Experimental Researches in Electricity. London: Richard and John Edward Taylor. – 1839.
3. Tipler, P.A., Mosca, G. Physics for Scientists and Engineers. New York: W. H. Freeman. – 2008.
4. Инженерный справочник: Электротехника. – URL: <https://example.com> (дата обращения 21.11.2024).
5. Lorrain, P., Electromagnetic Fields and waves / Lorrain, P., Corson, D. // Internet Archive. – 1970. 706 p.

© Мухаматулин Н.Р., Шарафутдинов Э.Д., Козлов В.А., 2024

А.А. МУЛЮКОВ, А.Р. АХМАДЕЕВ

mulyukov.067@yandex.ru

Науч. руковод. – д-р техн. наук, профессор **В.Е. ВАВИЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ПРИНЦИПА РАБОТЫ ЭЛЕКТРОГЕНЕРАТОРА

Аннотация: в данной статье продемонстрирован простейший электрогенератор. Он работает по принципу накопления электрического заряда в катушке за счёт изменения магнитного поля. Магнитное поле меняется за счёт внешнего воздействия кинетической энергии. Чем больше частота колебаний, тем выше значение электрического тока.

Ключевые слова: электрогенератор, индукция, магниты, проволока.

Электромагнитная индукция – это явление, при котором в проводящем контуре, например, в электропроводе, движущемся в постоянном магнитном поле, возникает электрический ток. Это происходит из-за изменения количества линий магнитной индукции, проходящих через контур.

Линии магнитной индукции – линии, которые иллюстрируют магнитное поле. Они показывают направление магнитной индукции, идущей от северного полюса постоянного магнита к южному полюсу постоянного магнита (рис.1). Линии магнитной индукции всегда замкнуты и непрерывны. Чем ближе линии друг к другу, тем сильнее магнитное поле в этой области. Если линии расположены далеко друг от друга – это указывает на более слабое магнитное поле. Также линии магнитной индукции перпендикулярны магнитным силам, действующим на движущиеся заряды в магнитном поле [1].

Магнитное поле – это вихревое поле, создаваемое движущимися электрическими зарядами или магнитными материалами. Оно характеризуется вектором магнитной индукции, который показывает направление и величину магнитной силы в каждой точке пространства. Магнитное поле играет важную роль в различных областях науки и техники, включая электродинамику, электротехнику, магнитную резонансную томографию и многие другие.

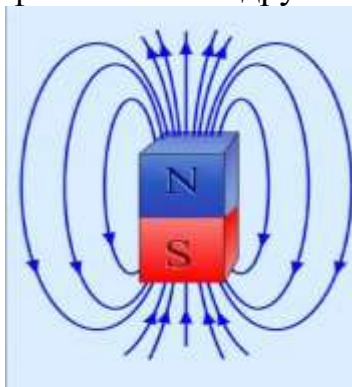


Рис. 1. Линии магнитной индукции

Электромагнитную индукцию описывает закон Фарадея.

Закон электромагнитной индукции (закон Фарадея): индуцированная электродвижущая сила (ЭДС) в замкнутом контуре равна отрицательной скорости изменения магнитного потока, проходящего через поверхность, ограниченную этим контуром.

Применение Закона Фарадея на практике (двигатель Фарадея) показано на рисунке 2.



Рис. 2. Двигатель Фарадея

Магниты

Магниты играют важную роль в современном мире, особенно в бытовой технике, электроприборах и датчиках. Их разнообразие и особенности делают их незаменимыми в различных приложениях. Рассмотрим основные виды и типы магнитов подробнее.

Виды магнитов

Электромагниты: работают за счет электрического тока. Их магнетизм можно включать и выключать, что позволяет использовать в устройствах, требующих управляемости (например, в электромагнитных замках, подъемниках).

Временные магниты: притягивающие свойства проявляют только при близком расположении к постоянному магниту. Например, это могут быть предметы из железа, которые временно намагничиваются.

Постоянные магниты: сохраняют свою намагниченность долгое время и используются во множестве повседневных предметов.

Виды постоянных магнитов

Постоянные магниты делятся на три основных вида по материалам и технологиям производства:

Ферритовые магниты: самые распространенные, легко доступны и недороги. Широко применяются в радиотехнике и для крепления предметов. Обладают высокой коррозионной стойкостью, устойчивы к высоким температурам и электрическим воздействиям.

Полимерные магниты: изготавливаются из смеси ферритового порошка с пластиком или резиной. Гибкие, легкие в обработке (можно резать, сверлить и изгибать). Сохраняют свои магнитные свойства даже при механической обработке.

Неодимовые магниты: имеют наивысшие характеристики среди постоянных магнитов. Состоят из сплава железа, бора и неодима, что придает им большую мощность. Способны сохранять свои магнитные свойства до 100 лет, не подвержены размагничиванию. Используются в высокотехнологичных сферах, таких как производство мощных генераторов и деталей для различной техники, благодаря своей способности удерживать значительные веса.

Применение магнитов

Каждый тип магнита имеет свои уникальные области применения. Например, ферритовые магниты используются в холодильниках и динамиках, полимерные — в изготовлении магнитных реклам и наклеек, а неодимовые находят применение в современных электронных устройствах, таких как высококачественные наушники и жесткие диски.

Знание о различных типах магнитов и их особенностях помогает лучше понимать, как они могут улучшать эффективность работы бытовых устройств и технологий, а также расширяет горизонты их применения в инновационных решениях.

Движение и накопление зарядов в катушке (рис. 3).

Если в катушку вдвигать магнит, в ней индуцируется ток, который создает магнитное поле, противоположное магнитному полю магнита. Если магнит выдвигать, направление индуцированного тока меняется, и создаваемое им магнитное поле противоположно магнитному полю магнита.

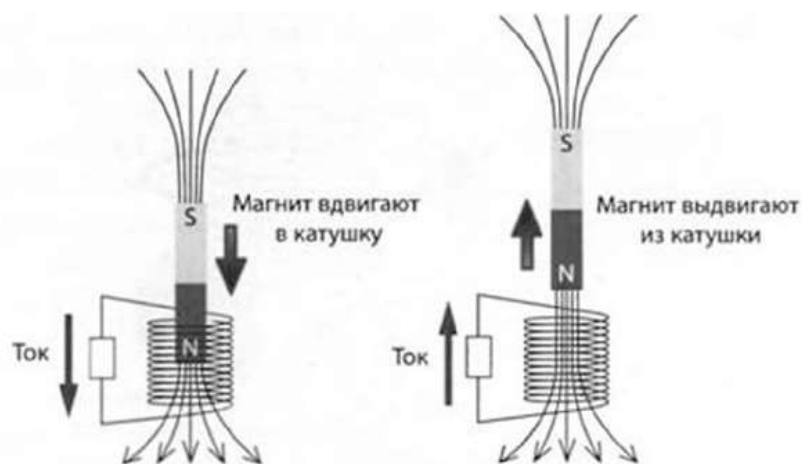


Рис. 3. Движение и накопление зарядов в катушке

Практическое применение теории (рис. 4).

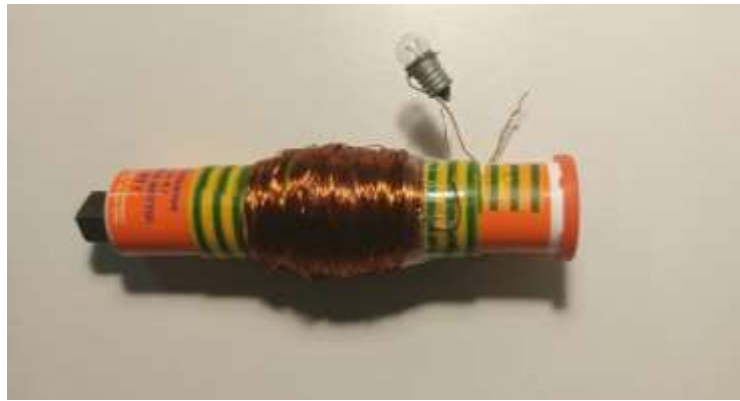


Рис. 4. Общий вид генератора

Материалы, используемые для создания генератора: цилиндрический пластиковый корпус, 3 магнита разной мощности, медная проволока, изолирующая лента, лампа накаливания [2].

Устройство генератора внутри показано на рис. 5-7.



Рис. 5. Вид изнутри



Рис. 6. Вид магнита



Рис. 7. Размеры магнита

Данный простейший электрогенератор работает благодаря воздействию на него внешней кинетической энергии. Путём колебательных движений, он генерирует электрический ток. Чем больше частота колебаний, тем больше электрического тока он будет вырабатывать.

Практическое применение генератора.

Данный простейший электрогенератор можно применять в условиях, когда нет электроэнергии и есть потребность в свете. Так же, установив диодный мост можно при помощи него заряжать телефон и прочие электрические приборы.

В данной статье были продемонстрированы законы и понятия электромагнитной индукции и электрического мира, а так же был рассмотрен и продемонстрирован на практике простейший электрогенератор, работающий по законам электрического мира.

Библиографический список.

1. Электромагнитная индукция. – URL: https://znano.ru/media/prezentatsiya_po_fizike_elektromagnitnaya_induktsiya_11_klass-365930 (дата обращения: 11.11.2024).

2. Генератор переменного тока. – URL: https://ru.wikipedia.org/wiki/Генератор_переменного_тока (дата обращения: 11.11.2024).

© Мулюков А.А., Ахмадеев А.Р., 2024

А.А. ЗИГАНШИН, О.Б. СИРАЗИТДИНОВ

ziganshin4lmaz@yandex.ru

Науч. руковод. – к. т. н., доц. В.М. ТЕРЕШКИН

Уфимский университет науки и технологий

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОГО ИЗ РЕЖИМОВ «4-Х КЛЮЧЕВОЙ КОММУТАЦИИ» ПЯТИФАЗНОЙ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

Аннотация. в работе приводятся три алгоритма пространственно-векторной модуляции в матричной форме, при которых в цикле работают пять фаз одновременно. Рассмотрен алгоритм управления, когда в цикле постоянно работают четыре фазы. Приведен расчет базового вектора и алгоритм управления в матричной форме. Отображены результаты экспериментальных исследований. В теоретических исследованиях использованы методы векторного анализа и непрерывные преобразования Фурье для нечетной функции. Результаты исследований могут быть применены при разработке электропривода на основе пятифазного двигателя.

Ключевые слова: пятифазная электромеханическая система, алгоритм пространственно-векторной модуляции в матричной форме, режим «4-х ключевой коммутации» пятифазного преобразователя.

Современным трендом в электротяге является электропривод на основе многофазного двигателя, о чем свидетельствует публикационная активность в данной области знания [1-7]. Увеличение числа фаз позволяет увеличить количество способы работы двигателя. Данное исследование направлено на изучение одного из режимов функционирования пятифазной электромеханической системы.

На рис.1 приведена функциональная схема пятифазной электромеханической системы, где изображено: симметричная пятифазная обмотка двигателя ABCDE, соединенная по схеме «звезда», которая подключена к источнику питания через мостовой преобразователь. Напряжение источника питания предполагаем равным единице $U_d = 1$.

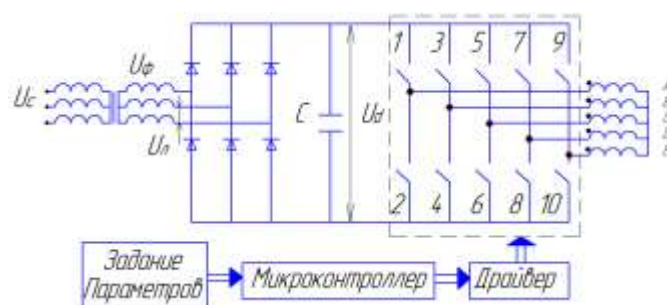


Рис. 1. Функциональная схема пятифазной электромеханической системы

Условно введем понятие – «5-ти ключевой» режим формирования алгоритма пространственно-векторной модуляции. В цикле этого режима работают пять фаз одновременно, формируя соответствующие эквивалентные схемы импульсного режима и определенные дискретные формы фазного напряжения. Три возможные формы фазного напряжения симметричного пятифазного напряжения приведены на Рис..

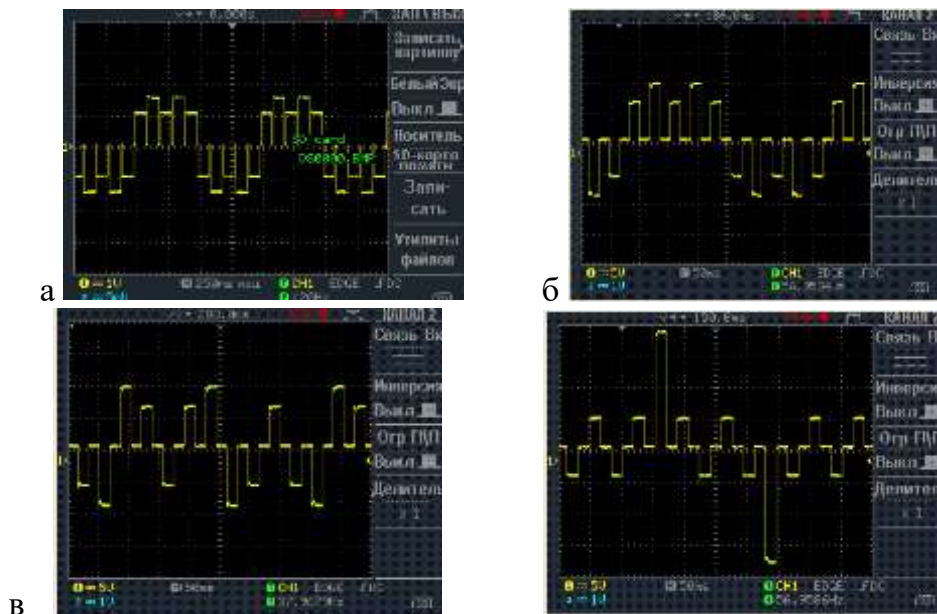


Рис. 2. Формы фазного напряжения 5-ти ключевой режима коммутации
а – ШИМ 100%, б – ШИМ 50%, в – ШИМ 50%, г – ШИМ 50%

На Рис.(а, б) изображена одна из форм фазного напряжения при ШИМ 100% и ШИМ 50%. На Рис.(в, г) изображены две формы фазного напряжения при ШИМ 50%. Формы соответствуют модулям базовых векторов: 1,618, 0,618 и 1.

Алгоритмы пространственно-векторной модуляции, реализующие симметричное пятифазное напряжение с изображенными на Рис. формами фазного напряжения, в матричной форме имеют вид:

Исследование данных режимов приведено в [8, 9]. В источниках [10, 11] рассматривается вопрос о необходимости исследования 4-х, 3-х и 2-х ключевой режимов коммутации, при которых в цикле постоянно работают соответственно четыре, три и две фазные обмотки пятифазного двигателя.

$$A = \begin{vmatrix} 1111100000 \\ 0011111000 \\ 0000111110 \\ 1000001111 \\ 1110000011 \end{vmatrix} \quad B = \begin{vmatrix} 1101100100 \\ 0011011001 \\ 0100110110 \\ 1001001101 \\ 0110010011 \end{vmatrix} \quad C = \begin{vmatrix} 0111010001 \\ 0101110100 \\ 0001011101 \\ 0100010111 \\ 1101000101 \end{vmatrix}$$

Экспериментальные временные диаграммы фазных напряжений данных режимов приведены на рис.3. На рис.3(а) представлена форма фазного напряжения 4-х ключевой режима коммутации ШИМ 50%; на рис.3(б) представлена форма фазного напряжения 3-х ключевой режима коммутации ШИМ 50%; на рис.3(в) представлена форма фазного напряжения 2-х ключевой режима коммутации ШИМ 50%. Каждая форма соответствует определенному алгоритму

пространственно-векторной модуляции. Существует множество других форм и алгоритмов.

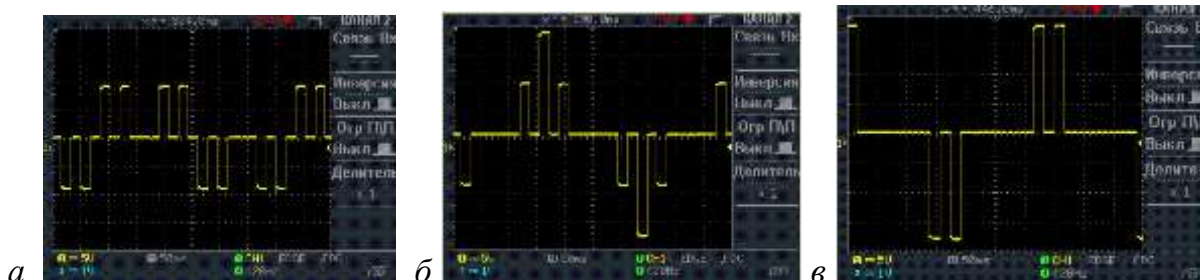


Рис. 3. Формы фазного напряжения 4-х, 3-х и 2-х ключевого режимов коммутации

При «4-х ключевой» коммутации, которая соответствует рис. 3(а), эквивалентная схема нагрузки преобразователя в импульсном режиме и теоретическая форма фазного напряжения при ШИМ 100 %, приведены на рис. 4.

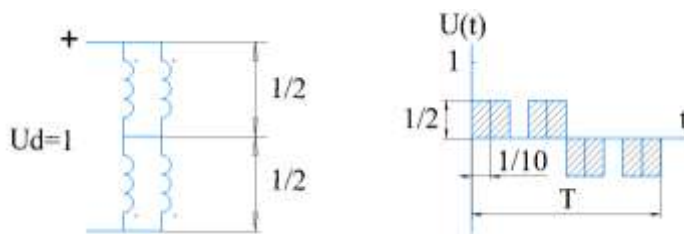


Рис. 4. Эквивалентная схема нагрузки и теоретическая форма фазного напряжения

Алгоритм управления преобразователем в матричной форме имеет вид:

$$A_4 = \begin{pmatrix} 11X1100X00 \\ 0011X1100X \\ 0X0011X110 \\ 100X0011X1 \\ X1100X0011 \end{pmatrix} \begin{matrix} A \\ B \\ C \\ D \\ E \end{matrix}$$

Модуль базиса равен 1/2 (0 в матрице соответствует базису -1/2; 1 соответствует базису 1/2); построение базового вектора, соответствующего первой строке матрицы, изображено на рис.5 (X в матрице обозначает отключение фазной обмотки, например, в первом столбце матрицы – X обозначает отключение фазы E, т.е. ключи 9 и 10 разомкнуты).

Модуль базового вектора определяется выражением:

$$|1| = 2(1/2)\cos(2\pi/5) + 2(1/2)\cos(\pi/5) = 1,118$$

На рис. 6 также изображена звезда базовых векторов, соответствующая матрице A_4 . Модуль каждого вектора равен: 1,118.

При 4-х ключевой коммутации согласно рис.1, последовательность переключений ключей представлена следующим образом: 1, 4, 6, 7; 1, 4, 8, 9; 3, 6, 8, 9; 1, 3, 6, 10; 1, 5, 8, 10; 2, 3, 5, 8; 2, 3, 7, 10; 4, 5, 7, 10; 2, 4, 5, 9; 2, 6, 7, 9. Всего

20 коммутаций за период.

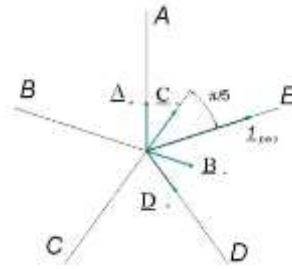


Рис. 5. Построение базового вектора, соответствующего первой строке матрицы A4

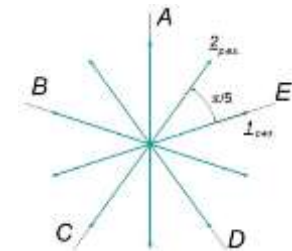


Рис. 6. Звезда базовых векторов пятифазной системы

Определим первую гармонику фазного напряжения, представленного на Рис. 4. Эквивалентная схема нагрузки и теоретическая форма фазного напряжения, путём разложения кривой в ряд Фурье. Аналитическое выражение для функции $u(t)$ имеет следующий вид:

$$u(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}, & \left(0 < t < \frac{\pi}{5}\right) \\ \frac{1}{2}, & \left(\frac{\pi}{5} < t < \frac{2\pi}{5}\right) \\ 0, & \left(\frac{2\pi}{5} < t < \frac{3\pi}{5}\right) \\ \frac{1}{2}, & \left(\frac{3\pi}{5} < t < \frac{4\pi}{5}\right) \\ \frac{1}{2}, & \left(\frac{4\pi}{5} < t < \pi\right) \end{cases}$$

Поскольку функция нечетна, ее разложение в ряд Фурье принимает следующий вид:

$$u(t) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin nt, \quad \text{где } n = 1, 2, 3, \dots \quad b_n = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} u(t) \sin ntdt$$

Амплитуду первой гармоники можно вычислить по формуле:

$$b_1 = \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{5}} \frac{1}{2} \sin tdt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{2\pi}{5}} \frac{1}{2} \sin tdt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{2\pi}{5}}^{\frac{3\pi}{5}} 0 \sin tdt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{3\pi}{5}}^{\frac{4\pi}{5}} \frac{1}{2} \sin tdt + \frac{2}{\pi} \int_{\frac{4\pi}{5}}^{\pi} \frac{1}{2} \sin tdt$$

$$\begin{aligned}
b_1 &= -\frac{2}{\pi} \frac{1}{2} (\cos \frac{\pi}{5} - \cos 0) - \frac{2}{\pi} \frac{1}{2} (\cos \frac{2\pi}{5} - \cos \frac{\pi}{5}) - \\
&- \frac{2}{\pi} 0 (\cos \frac{3\pi}{5} - \cos \frac{2\pi}{5}) - \frac{2}{\pi} \frac{1}{2} (\cos \frac{4\pi}{5} - \cos \frac{3\pi}{5}) - \frac{2}{\pi} \frac{1}{2} (\cos \pi - \cos \frac{4\pi}{5}) = \\
&= -\frac{2}{\pi} \frac{1}{2} (\cos \frac{\pi}{5} - 1 + \cos \frac{2\pi}{5} - \cos \frac{\pi}{5} + \cos \frac{4\pi}{5} - \cos \frac{3\pi}{5} - 1 - \cos \frac{4\pi}{5}) = \\
&= -\frac{2}{\pi} \frac{1}{2} (2 \cos \frac{2\pi}{5} - 2) = \frac{2}{\pi} (1 - \cos \frac{2\pi}{5}) = 0,44
\end{aligned}$$

При четырехтактной коммутации пятифазного преобразователя амплитуда первой гармоники фазного напряжения составляет $b_1 = 0,44$. Следовательно, действующее значение синусоидальной составляющей первой гармоники равно $U_{14} = 0,31 b_1 \cdot U_{\phi} \approx 0,31$. Предположим, действующее значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора $U_{\phi} = 115$ В, а коэффициент передачи выпрямителя $K_d = 2,35$. Тогда:

$$\begin{array}{rcl}
1 & - & 0,31 \\
2,35 \times 115 & - & \underline{U_{14}}
\end{array}$$

При реализации алгоритма пространственно-векторной модуляции по матрице A_4 снижается коэффициент использования по напряжению в сравнении с вариантами алгоритмов по матрицам A, B, C .

Однако, положительным фактором применения алгоритма по матрице A_4 является то, что уменьшается (до нуля) пульсация потенциал общей точки обмотки относительно «нуля» преобразователя. Предположительно именно пульсация потенциала общей точки вызывает вибрации электромагнитного происхождения радиального типа.

В пятифазной обмотке пульсации потенциала общей точки относительно нуля преобразователя обусловлены пятой гармоникой напряжения. Аналогично, в трехфазной – третьей, в семифазной – седьмой и т.д. Определим амплитуду пятой гармоники фазного напряжения по рис. 4.

$$\begin{aligned}
b_5 &= \frac{1}{5} \frac{2}{\pi} \int_0^{\frac{\pi}{5}} \frac{1}{2} \sin 5td5t + \frac{1}{5} \frac{2}{\pi} \int_{\frac{\pi}{5}}^{\frac{2\pi}{5}} \frac{1}{2} \sin 5td5t + \frac{1}{5} \frac{2}{\pi} \int_{\frac{2\pi}{5}}^{\frac{3\pi}{5}} 0 \sin 5td5t + \frac{1}{5} \frac{2}{\pi} \int_{\frac{3\pi}{5}}^{\frac{4\pi}{5}} \frac{1}{2} \sin 5td5t + \frac{1}{5} \frac{2}{\pi} \int_{\frac{4\pi}{5}}^{\pi} \frac{1}{2} \sin 5td5t \\
b_5 &= -\frac{2}{\pi} \frac{1}{2} \frac{1}{5} (\cos \frac{5\pi}{5} - \cos 0) - \frac{2}{\pi} \frac{1}{2} \frac{1}{5} (\cos \frac{10\pi}{5} - \cos \frac{5\pi}{5}) - \\
&- \frac{2}{\pi} 0 (\cos \frac{15\pi}{5} - \cos \frac{10\pi}{5}) - \frac{2}{\pi} \frac{1}{2} \frac{1}{5} (\cos \frac{20\pi}{5} - \cos \frac{15\pi}{5}) - \frac{2}{\pi} \frac{1}{2} \frac{1}{5} (\cos 5\pi - \cos \frac{20\pi}{5}) = \\
&= -\frac{2}{\pi} \frac{1}{2} \frac{1}{5} (\cos \frac{5\pi}{5} - 1 + \cos \frac{10\pi}{5} - \cos \frac{5\pi}{5} + \cos \frac{20\pi}{5} - \cos \frac{15\pi}{5} - 1 - \cos \frac{20\pi}{5}) = 0
\end{aligned}$$

Режим пространственно-векторной модуляции в пятифазной электромеханической системе может быть реализован посредством «4-х ключевой коммутации», при котором в цикле постоянно работают четыре фазы пятифазного электродвигателя. Коэффициент использования по напряжению в электромеханической системе уменьшается, но при этом улучшаются виброшумовые характеристики пятифазного двигателя. Результатом разработки

алгоритма пространственно-векторной модуляции является его матричная форма. Анализ первого столбца матрицы, представляющего один из базовых векторов, показал, что его модуль при единичном входном напряжении преобразователя составляет 1,118.

Библиографический список

1. Duran, M.J. Gonzalez-Prieto, I., Gonzalez-Prieto, A., Aciego, J.J. The Evolution of Model Predictive Control in Multiphase Electric Drives: A Growing Field of Research // IEEE Industrial Electronics Magazine. – 2022. – Vol. 16. № 4. P. 29–39.

2. Gonzalez-Prieto, A. Dynamic Response in Multiphase Electric Drives: Control Performance and Influencing Factors // Machines. – 2022. – Vol. 10 № 10. P. 866.

3. Gonzalez, O., Ayala, M., Romero, C., Model Predictive Current Control of Six-Phase Induction Motor Drives Using Virtual Vectors and Space Vector Modulation // IEEE Transactions on Power Electronics. – 2022. – Vol 37(7), P. 7617–7628.

4. Голубев А.Н., Алейников А.В Алгоритм управления, улучшающий вибросиловые характеристики многофазного магнитоэлектрического электропривода // Вестник ИГЭУ. – 2021. – №6. С. 38–44.

5. Алейников А.В., Голубев А.Н Разработка алгоритма управления, уменьшающего вибрации многофазного синхронного электродвигателя // в сборнике: «Актуальные проблемы электроэнергетики. Сборник научно-технических статей конференции». Нижний Новгород. – 2021. С.69–75.

6. Голубев А.Н. Синхронный многофазный электропривод с управлением по основному энергетическому каналу // Вестник ИГЭУ. – 2023. – №1. С. 53–59.

7. Томасов В.С., Усольцев А.А., Моравец М., Несимметричные режимы в многофазных двигателях и приводах // Электротехника. – 2021. – №7. С.2–12.

8. Терешкин В.М., Баландин С.П., Гусев Д.С., Пространственно-векторная модуляция в многофазных электромеханических системах // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2023. – № 4-6. С.21–26.

9. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Терешкин В.В., Балгазин И.И. Алгоритмы управления пятифазного преобразователя, реализующие пространственно-векторную модуляцию // Вестник МЭИ. – 2021. – № 4. С 86–94.

10. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А. Перспективы применения многофазных машин переменного тока // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2017. – № 1. С 19–26.

11. Терешкин В.М., Гришин Д.А., Макулов И.А. Трехключевой режим коммутации пятифазного преобразователя. Обобщенный вектор напряжения пятифазной системы при трехключевой коммутации // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2018. – № 4. С. 9–15.

12. Терешкин В.М., Аитов И.Л., Гришин Д.А., Терешкин В.В. Пульсация потенциала общей точки трехфазной и пятифазной обмоток относительно «нуля» преобразователя // Вестник МЭИ. – 2021. – № 2. С 51–59.

© Зиганшин А.А., Сиразитдинов О.Б., 2024

А.С. НАГОРНОВ

nagornov.anton37@gmail.com

Науч. руковод. – д-р. техн. наук, профессор **Ф.Р. ИСМАГИЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГЕТИКИ

Аннотация: солнечная энергетика является одним из наиболее перспективных источников электроэнергии по всему миру. Увеличение доступности и снижение затрат становятся основными факторами повышения востребованности интегрирования солнечных электростанций в работу централизованных электросетей, стремящихся повысить надежность снабжения потребителей. В данной статье будут рассмотрены ключевые направления развития отрасли, ведущие к увеличению электросетевой надежности.

Ключевые слова: солнечная энергетика, возобновляемый ресурс, электрическая сеть.

Мировой рынок солнечной энергетики

2024 год для мирового рынка солнечной энергетики стал одним из наиболее значимых и продуктивных с приростом генерирующих мощностей более 45%, успех обусловлен увеличением спроса на возобновляемые источники энергии, снижением затрат на комплектующие материалы, упрощением подключения к сети, а также поддержкой со стороны государства. Рассмотрим основные тенденции и характеристики этого рынка [1]:

Основные тенденции

1. Рост генерирующих мощностей: установленная мощность солнечных панелей по всему миру неуклонно растет к концу 2024 отчетного года. По данным Международного энергетического агентства (IEA) к началу 2025 года общая мощность солнечной энергетики превысит 1,2 ТВт.

2. Лидером по внедрению солнечной энергетики остается Китай, за ним следуют США, Индия, а также страны Европейского Союза. Россия в настоящий момент в большей степени полагается на традиционные источники электроэнергии.

3. Снижение цен: стоимость по производству, доставке и обслуживанию солнечных панелей продолжает снижаться благодаря технологическим достижениям и экономии на масштабе, что играет важную роль в распространении солнечной энергетики по всему миру.

4. Развитие отрасли: разработка перовскитных солнечных панелей и систем хранения энергии, способствует повышению эффективности и снижению затрат.

Политическая поддержка

1. Государственные программы: многие страны внедряют программы субсидирования и налоговые льготы для стимулирования установки солнечных

панелей, что, в свою, очередь способствует снижению разрушения озонового слоя планеты.

2. Международные соглашения: частые взаимодействие стран по решению мировых вопросов энергетики, таких как Парижское соглашение, способствуют увеличению инвестиций в возобновляемые источники энергии, включая солнечную.

Региональные особенности

1. Азия: в Азии наблюдается значительный рост спроса на солнечную энергетику, особенно в Китае и Индии.

2. Америка: в США наблюдается рост установок солнечных панелей как на уровне коммунальных служб, так и среди частных домовладельцев. Поддержка со стороны правительства и снижение цен на оборудование способствует увеличению популярности распределенной генерации среди населения.

3. Европа: в Европе интерес к солнечной энергетике повышается как в рамках крупных проектов, так и в виде домашних систем, хоть и совсем незначительно в сравнении с Азией. Германия, Испания и Италия, продолжают занимать лидирующие позиции на этом рынке.

Проблемы и вызовы

1. Зависимость от сырья: производство солнечных панелей зависит от поставок сырья, таких как кремний, месторождения которого истощаются в условиях повышенного спроса [2].

2. Экологические вопросы: утилизация старых солнечных панелей, а также воздействие на окружающую среду становятся важными темами для обсуждения.

3. Конкуренция с другими источниками энергии: солнечная энергетика сталкивается с конкуренцией со стороны других источников энергии, наиболее остро стоит вопрос по замещению традиционных источников энергии.

Перспективы развития солнечной энергетики

Поскольку мир продолжает двигаться к более устойчивому энергетическому будущему, солнечная энергия стала жизнеспособным вариантом для обеспечения надежных электрических сетей. Солнечная энергия является возобновляемой и гибкой, что означает, что она может обеспечить электроэнергией большие площади с минимальными затратами и воздействием на окружающую среду. С внедрением солнечных электростанций для выработки электроэнергии, электрические сети могут стать более надежными и снизить свою зависимость от невозобновляемых источников энергии [3].

Растущее использование солнечной энергии имеет много перспективных направлений развития. Солнечная энергия может использоваться для питания домов, предприятий и целых городов, помогая обеспечить стабильное и бесперебойное электроснабжение. Кроме того, солнечная энергия не производит никаких вредных выбросов и может уменьшить наш углеродный след.

Развитие солнечной энергетики достигло больших успехов, и в настоящее время солнечные панели используются во многих местах по всему миру. Субсидии и льготные тарифы правительства стимулируют население, побуждая использовать

солнечную энергию. Эти усилия помогают снизить стоимость солнечной энергии и повысить ее доступность [4].

Хотя использование солнечной энергии все еще имеет некоторые ограничения, очевидно, что этот возобновляемый ресурс может повысить надежность электросетей. По мере дальнейшего совершенствования технологий потенциал солнечной энергии как основного источника мирового электроснабжения будет продолжать расти. Будущее солнечной энергетики радужно, и вполне вероятно, что в ближайшие годы мы увидим, замещение традиционных источников электроэнергии возобновляемыми.

Основными перспективными и ведущими к увеличению общей надежности электрических сетей мероприятиями в настоящее время являются:

- использование концентрированной солнечной энергии (CSP), которое использует зеркала для фокусировки солнечного света на приемниках и преобразования его в тепловую энергию. Этот тип солнечной энергии обеспечивает более высокую эффективность, чем традиционные фотоэлектрические элементы, являясь привлекательной перспективой для производства электроэнергии [5];

- внедрение плавучих солнечных ферм для поддержки фотоэлектрических элементов, что позволяет им использовать преимущества водоемов, избегая затрат на приобретение земли;

- исследование возможностей использования накопителей солнечной тепловой энергии (STES), включая запас энергии от солнечного света в периоды высокого спроса, а затем высвобождение ее в периоды, когда спрос на электроэнергию меньше;

- выполнение перспективных расчетов по возможности объединения различных видов возобновляемой энергии, таких как ветер и солнце, для достижения максимальной эффективности. В ближайшее время могут появиться гибридные системы, которые объединят различные виды солнечной энергии с другими технологиями, такими как водородные топливные элементы или турбины на природном газе. Кроме того, усовершенствованные системы слежения могли бы обеспечить эффективное улавливание солнечной радиации на больших площадях в любой момент времени [6];

- вовлечение развивающейся технологии «Smart grid», может быть использовано для координации потоков электроэнергии между потребителями и поставщиками солнечной энергии, что приведет к повышению надежности;

- применение достижений в области искусственного интеллекта и алгоритмов машинного обучения для оптимизации производительности систем солнечной энергетики, что приведет к повышению энергоэффективности и лучшему использованию имеющихся ресурсов [7].

Все эти перспективные разработки имеют многообещающие перспективы для повышения надежности и доступности электрических сетей, а также свидетельствуют о том, что солнечная энергия становится все более жизнеспособным и надежным вариантом питания электрических сетей.

Библиографический список

1. Renewables 2024 Global Status Report [Электронный ресурс] // URL: <https://renewables.org/category/vie/solar/> (дата обращения: 15.10.2024).
2. Земсков В. И., Возобновляемые источники энергии в АПК: учебное пособие / В. И. Земсков. – Санкт-Петербург: Лань, 2014. – 368 с. – ISBN 978-5-8114-1647-9. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/> (дата обращения: 01.09.2024).
3. Юдаев И. В., Возобновляемые источники энергии: учебник / И. В. Юдаев, Ю. В. Даус, В. В. Гамага. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 328 с. – ISBN 978-5-8114-4680-3. – Текст: электронный // Лань: электронно-библиотечная система. URL: <https://e.lanbook.com/book/140747> (дата обращения: 10.10.2024).
4. Возможности для солнечной энергетики в России [Текст]. Берлин: Eclareon GmbH, 2019. С. 113.
5. Городов Р.В., Нетрадиционные и возобновляемые источники энергии: учебное пособие [Текст] / Р.В. Городов, В.Е. Губин, А.С. Матвеев. – Томск: Издательство ТПУ, 2019. С.294
6. 2024 Global Energy Interconnection (Asia) Conference [Электронный ресурс] // URL: <https://m.geidco.org.cn/category/23?lang=en> (дата обращения: 01.11.2024)
7. Сидорович В.М., Мировая энергетическая революция. Как возобновляемые источники энергии изменят наш мир [Текст]. М.: Альпина Паблишер, 2020. С.230.

© Нагорнов А.С., 2024

У.Н. ЯЛАЕВ, Р.С. ШИПУЛЬ, Р.А. ТУХВАТШИН

yalaev.ural@mail.ru, rom4000ka@gmail.com, ranistukhvatshin2000@gmail.com

Науч. руковод. – д-р техн. наук, профессор **Ф.Р. ИСМАГИЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ДВИГАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО И ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

Аннотация: статья посвящена анализу принципов работы трёх типов электрических двигателей коллекторного синхронного и асинхронного в работе подробно рассматриваются основные характеристики каждого типа двигателей их преимущества и недостатки области применения особое внимание уделяется сравнению эффективности и экономичности различных систем, а также анализу факторов, влияющих на их работу

Ключевые слова: коллекторный двигатель, постоянный ток, переменный ток, электрические машины, асинхронный двигатель, синхронный двигатель.

В природе электричество в практически пригодной форме отсутствует, но его можно трансформировать из других видов энергии. Генераторы выполняют функцию преобразования механической энергии, получаемой от таких источников, как ветер, водные потоки и пар, в электрическую.

Электромеханические устройства представляют собой класс аппаратов, способных осуществлять взаимное преобразование механической и электрической энергии.

Электродвигатели относятся к механизмам, преобразующим электрическую энергию (из батареи или сети) в механическую, генерируя вращающий момент. Основные принципы работы электродвигателей:

Двигатели переменного и постоянного тока работают по принципу электромагнитной индукции, когда прямоугольную электрическую катушку помещают в переменное магнитное поле и проходящий через нее ток придает обмотке некое угловое ускорение.

Это следует из закона Ампера, согласно которому, когда ток, проходящий по проводнику, создаёт магнитное поле, которое может взаимодействовать с другими магнитными полями создавая силу, которая приводит ротор во вращение. Говоря простыми словами, это прототип очень простого генератора, поскольку ток используется для выработки механической энергии

А. Коллекторный двигатель постоянного тока

Двигатели постоянного тока DC имеют решающее значение для точного управления скоростью эти двигатели были изобретены во время первых экспериментов с электричеством и постепенно двигатели постоянного тока стали неотъемлемой частью различных промышленных установок и современных робототехнических систем.

Двигатель постоянного тока состоит из [2]:

1. Постоянный магнит,
2. Разъемные кольца,
3. Катушка или якорь,
4. Угольные щетки.

Если мы посмотрим на двигатель постоянного тока, то сначала увидим металлический защитный кожух, который обычно статичен он образует статор, который состоит из рамы и сердечника с выступающими полюсами эти полюса изготовлены из кремнистой стали на которую намотана изолированная медная проволока эти полюса закреплены болтами внутри рамы, когда через них проходит ток создаётся магнитное поле.

Двигатели постоянного тока работают по принципу прямого тока, а в их основе лежит коммутация механизм необходимый для изменения направления потока тока внутри двигателя что обеспечивает непрерывное вращение направление силы вращения определяется по правилу Флеминга (правой руки), а величина определяется по формуле:

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin\alpha,$$

где: B – индукция магнитного поля, Тл;

I – ток в проводнике, А;

l – длина проводника, М;

α – это угол между магнитным полем и током в проводнике, град.

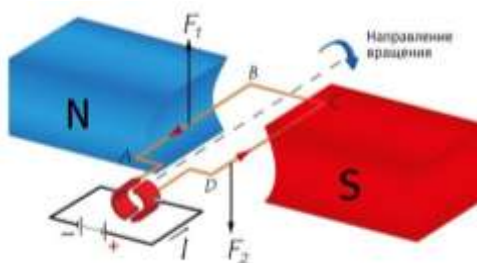


Рис. 1. Упрощенная схема работы двигателя постоянного тока

Коммутация в двигателях постоянного тока включает в себя коммутатор и щётки взаимодействие которых для изменения направления тока и динамической регулировки магнитных полей двигателя она нужна для эффективного преобразования электрической энергии в механическое движение переключение коммутатора точно синхронизировано с положением ротора чтобы оптимизировать крутящий момент и скорость вращения двигателя.

В. Синхронный двигатель переменного тока

Рассматривая устройство, можно сказать, что оно аналогично конструкции других двигателей: статор и ротор – это ключевые элементы, они образуют электрическую и магнитную цепи синхронного двигателя, а рама служит корпусом. Для начала следует сказать о статоре:

Как следует из названия, статор является неподвижной частью двигателя, на неё подаётся переменный ток. Это внешняя рама цилиндрической формы. Эта

цилиндрическая рама ламинирована и имеет пазы для размещения схем намотки. Ротор же является вращающейся частью, его скорость равна скорости магнитного поля статора. Он также имеет цилиндрическую форму и представляет собой вал двигателя, к которому подключается выходная нагрузка. Ротор вращается в корпусе статора, который отделён воздушным зазором. Ротор синхронного двигателя приводится в движение источником постоянного тока. Рама двигателя защищает и закрывает весь механизм. Она может быть вертикальной или горизонтальной, а тип покрытия зависит от области применения.



Рис. 2. Схема работы синхронного двигателя

Теперь стоит поговорить о работе этих двигателей. Приступим. Синхронный двигатель работает по очень принципу: ротор стремится догнать магнитное поле статора и вращается с частотой, близкой к частоте вращения поля (см. рисунок 2). Этот тип двигателя относится к машинам с двойным возбуждением. (Электрохимическая система, в которой используются две независимые друг от друга провода катушки для создания магнитного поля, называется системой с двойным возбуждением. Таким образом, для системы с двойным возбуждением требуется два отдельных электрических входа.) Обмотка ротора получает питание от источника постоянного тока, обмотка же статора — от источника переменного тока, она создаёт вращающееся магнитное поле, которое вращается с частотой, соответствующей частоте переменного тока. Обмотка ротора создаёт постоянное магнитное поле.

В определённые моменты времени вращения полюса двух магнитных полей могут притягиваться друг к другу или отталкиваться друг от друга. Из-за инерции ротора его вращение не начнётся сразу после этих взаимодействий, и поэтому внешний источник компенсирует и обеспечивает начальное вращение ротора. Когда же ротор начинает двигаться с синхронной скоростью, внешний источник отключается.

В синхронном двигателе магнитное поле ротора создаётся не за счёт индукции, а за счёт подачи постоянного тока. Поэтому воздушный зазор между ротором и статором не такой маленький, как в асинхронных двигателях.

С. Асинхронный двигатель переменного тока [3]

В конструкцию асинхронных двигателей входят два основополагающих компонента:

1. Статор, представляющий собой цилиндрическую основу мотора, и
2. Ротор.

Статическая часть (статор) оснащена обмотками, распределенными равномерно по ее внутренней поверхности; каждая из них включает в себя комплекс электрических соединений на внешнем корпусе рамы. Второй важный элемент - ротор. Это цилиндрический сердечник, плотно установленный внутри статора и вращающийся вокруг общего вала двигателя. Вал проходит через центральную ось ротора, обеспечивая его вращение с двух сторон поддерживается подшипниками. Роторы асинхронных двигателей изготавливаются либо целиком из стали (монокристаллический), либо состоят из параллельно расположенных стальных или медных стержней без возможности электрического возбуждения. Этот двигатель работает по принципу закона Ленца (Мощность тепла, выделяемого в единице объема среды при протекании постоянного электрического тока, равна произведению плотности электрического тока на величину напряженности электрического поля.), который гласит, что направление тока, индуцированного в проводнике изменением магнитного поля, таково, что магнитное поле, создаваемое этим током, противостоит изменяющемуся магнитному полю, которое его создает.

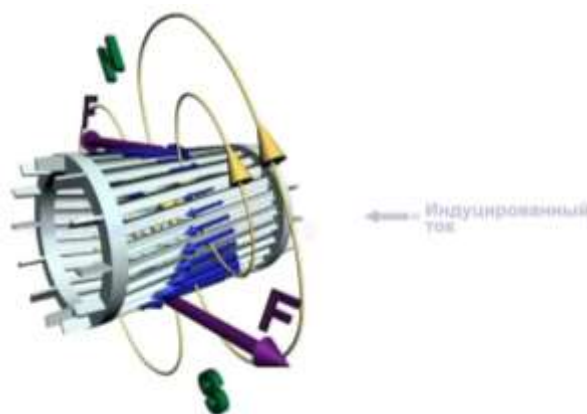


Рис. 3. Схема работы асинхронного двигателя

Принцип работы этого двигателя схож с принципом работы синхронного двигателя, отличием является наличие внешнего возбудителя. Принцип действия асинхронного электродвигателя основан на явлении электромагнитной индукции: вращающееся магнитное поле статора наводит в роторе вихревые токи. В отличие от синхронных аналогов, ротор асинхронного двигателя не достигает синхронной скорости вращения с полем статора. Возникающие в роторных обмотках токи взаимодействуют с магнитным полем, порождая вращающий момент и приводя ротор во вращение. В результате вращения ротора возникает крутящий момент.

В результате анализа принципов работы коллекторного, синхронного и асинхронного двигателей можно сделать следующие выводы:

Коллекторные двигатели отличаются простотой конструкции и относительно низкой стоимостью, но имеют недостатки, связанные с наличием коллектора и щёток, которые требуют обслуживания и могут вызывать искрение [4, 5].

Синхронные двигатели обладают высоким КПД и хорошими регулировочными характеристиками, но требуют наличия внешнего источника постоянного тока для создания магнитного поля.

Асинхронные двигатели являются наиболее распространённым типом электрических двигателей благодаря своей простоте, надёжности и относительно низкой стоимости. Они не требуют наличия внешнего источника постоянного тока, но имеют некоторые ограничения по регулированию частоты вращения.

Библиографический список

1. Motion Control in Robotics: 4 Types of Motors for Industrial Robots – URL: <https://www.wevolver.com/article/motion-control-in-robotics-4-types-of-motors-for-industrial-robots> (дата обращения 08.11.2024).

2. Main Difference Between Synchronous and Asynchronous Motor – URL: <https://www.electricaltechnology.org/2020/09/difference-synchronous-asynchronous-motor.html> (дата обращения 08.11.2024).

3. Asynchronous Motor: Construction, Working, Differences & Its Applications – URL: <https://www.elprocus.com/what-is-an-asynchronous-motor-construction-its-working/> (дата обращения 08.11.2024).

4. DC Motor: Definition, Construction, Working, Types, and Uses – URL: <https://www.geeksforgeeks.org/dc-motor/> (дата обращения 09.11.2024).

5. AC and DC Motors: Differences and Advantages. Types of Electric Motors – URL: <https://www.gainesvilleindustrial.com/blog/ac-dc-motors/> (дата обращения 09.11.2024).

6. Сурин, В. М., Боровиков, С. М. Электромеханические и электромагнитные устройства систем безопасности : учеб.-метод. пособие / В. М. Сурин, С. М. Боровиков, Н. В. Вышинский. – Минск: БГУИР, 2014. 136 с. : ил. – URL: https://libeldoc.bsuir.by/bitstream/123456789/1531/1/Surin_2014.pdf (дата обращения 09.11.2024)

7. Всё про синхронный двигатель – URL: https://energetik.uz/blogs/vsyo_pro_sinxronniy_dvigatel-38.php (дата обращения 09.11.2024)

© Ялаев У.Н., Шипуль Р.С., Тухватшин Р.А., 2024

Д.Р. ИЛЬЯСОВ, Ш.Н. ШАРАФУТДИНОВ

david.ilyasow@gmail.com, sharshamil98@gmail.com

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. **И.И. ЯМАЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ТЕНДЕНЦИИ РАЗВИТИЯ ТЕХНОЛОГИИ МАГНИТНЫХ ПОДШИПНИКОВ

Аннотация: активные магнитные подшипники (АМП) выгодно отличаются от традиционных подшипников благодаря своим преимуществам, заключающимся в бесконтактном использовании и активном управлении. Однако, существует ряд проблем, препятствующих дальнейшему распространению АМП, которые включают в себя обширные знания, необходимые для проектирования сложной системы, и, следовательно, высокую стоимость проектирования. В статье будут кратко рассмотрены основные тенденции развития АМП и сферы применения.

Ключевые слова: активные магнитные подшипники, АМП, электромагнетизм, системы автоматического управления

Магнитные подшипники представляют собой технологию, использующую магнитные силы для поддержания и стабилизации вращающихся компонентов без физического контакта. Их основное преимущество заключается в минимизации трения и износа, что делает их привлекательными для высокоскоростной и точной техники.

Магнитные подшипники можно разделить на две основные группы: на пассивные и активные. Пассивные МП используют постоянные магниты, а активные требуют управления с помощью электромагнитов и сложных электронных систем.

Активные магнитные подшипники особенно востребованы в таких областях, как турбомашин, компрессоры и станкостроение. Современные исследования сосредоточены на повышении надежности, энергоэффективности и интеграции с цифровыми технологиями, такими как системы мониторинга и адаптивное управление.

Однако у магнитных подшипников есть свои ограничения и проблемы:

1. **Высокая стоимость:** Активные магнитные подшипники требуют использования сложных систем управления и точных электромагнитов, что приводит к высокой стоимости производства и внедрения. В исследованиях подчеркивается необходимость снижения стоимости компонентов и разработки новых подходов к производству для расширения применения технологии. Например, в статье [1] обсуждаются пути снижения затрат за счет оптимизации материалов и технологических процессов.

2. **Сложность в управлении:** Технология активных магнитных подшипников требует постоянного контроля за положением ротора и оперативного реагирования

системы управления. В статье [2], освещают проблемы разработки систем с высоким быстродействием и устойчивостью. Использование современных алгоритмов, включая адаптивное управление и машинное обучение, позволяет повысить эффективность работы системы, но увеличивает сложность ее разработки и внедрения.

3. Энергозависимость: Энергозависимость активных магнитных подшипников остается серьезным ограничением, так как прекращение подачи питания приводит к потере работоспособности системы. В [3] исследуются пути повышения надежности системы, включая применение резервных источников питания и развитие энергоэффективных режимов работы.

Таким образом наметились основные тенденции развития магнитных подшипников: современные разработки в области АМВ активно фокусируются на снижении энергопотребления, поскольку системы управления являются основным источником потребления энергии в этих технологиях. Главные направления работы включают:

1. Оптимизация управляющих алгоритмов: Использование интеллектуальных методов, таких как нейронные сети, алгоритмы машинного обучения и адаптивное управление, позволяет динамически изменять параметры управления в зависимости от рабочих условий. Это помогает снизить избыточное энергопотребление без ущерба для стабильности системы.

Исследования показывают, что применение многоцелевых оптимизационных алгоритмов, таких как NSGA-II, может одновременно снизить энергопотребление и повысить точность контроля [2].

2. Снижение потерь в системе: Применение новых материалов, таких как ферромагнитные сплавы с высокой магнитной проницаемостью, способствует уменьшению тепловых потерь. Минимизация токов утечки и вихревых токов благодаря усовершенствованию геометрии элементов системы.

3. Интеграция энергосберегающих технологий: Использование энергоэффективных источников питания и инверторов с низкими потерями. Применение методов регенерации энергии: часть энергии, генерируемой системой в процессе торможения или изменения состояния, может быть возвращена в цепь питания.

4. Моделирование и оптимизация систем: Разработка нелинейных моделей для учета насыщения магнитного потока позволяет улучшить точность расчетов и уменьшить избыток мощности, необходимой для стабильности. Примером успешной реализации данных подходов является работа [2], где описаны методы многоцелевой оптимизации для достижения компромисса между энергопотреблением, стабильностью и динамическими характеристиками АМВ. Эти подходы открывают новые возможности для снижения эксплуатационных затрат и увеличения надежности систем.

Интеграция с системами мониторинга состояния: Датчики и системы мониторинга позволяют отслеживать параметры работы подшипников в реальном времени и прогнозировать их ресурс.

Миниатюризация и использование в микроэлектромеханических системах (MEMS): Миниатюризация активных магнитных подшипников и их использование

в микроэлектромеханических системах (MEMS) открывают новые перспективы для создания компактных, высокоточных и чувствительных решений в таких областях, как медицина, космические технологии, робототехника и микрообработка. Основные направления развития включают:

Миниатюризация подшипников и их компонентов:

Разработка малогабаритных активных магнитных подшипников, которые могут поддерживать миниатюрные роторы и устройства в масштабах микро- и наноразмеров. Это включает использование микромагнитов и специализированных материалов, таких как ферромагнитные сплавы, которые обеспечивают необходимую магнитную проницаемость при малых размерах [4].

Использование нанотехнологий для создания более компактных и эффективных систем, включая усовершенствование конструкции магнитных катушек и улучшение управления магнитным полем для точного позиционирования и стабилизации.

В таких миниатюрных решениях также используется высокоэффективная система управления с низким энергопотреблением, что критично для продолжительной работы в малых устройствах, таких как MEMS.

Применение в высокоточных и чувствительных приложениях:

Медицинские устройства: Активные магнитные подшипники находят применение в микро- и нанообработке, а также в устройствах, таких как искусственные сердца, насосы и другие медицинские имплантаты, где требуется высокая точность и надежность. Миниатюризация позволяет создавать устройства, которые могут работать в теле человека, минимизируя инвазивность и обеспечивая высокую степень безопасности [5].

Космические технологии: для работы космических аппаратов необходимо эффективное и надежное электроприводное оборудование. Поддержание вращающихся элементов без трения с использованием магнитных подшипников в таких условиях важно для обеспечения долговечности и точности работы в условиях вакуума и экстремальных температур. Миниатюризация таких подшипников позволяет интегрировать их в компактные и высокоэффективные устройства.

Микрообработка и нанотехнологии: для высокоточных манипуляторов и сканеров в микрообработке важна стабильная работа на очень высоких оборотах и с минимальными вибрациями. Использование MEMS с активными магнитными подшипниками позволяет достичь требуемой точности и минимизировать влияние внешних факторов.

Снижение стоимости и улучшение производственных процессов:

Производство миниатюрных магнитных подшипников требует инновационных подходов к массовому производству. Например, использование фотолитографии для создания магнитных структур или применения новых материалов с оптимизированными магнитными свойствами позволяет снижать стоимость производства и повышать доступность таких решений.

Разработка интегрированных решений, где магнитные подшипники могут быть сочетаны с другими элементами MEMS, такими как датчики и микроприводы, способствует созданию полностью функциональных и компактных устройств [6].

Активные магнитные подшипники обладают значительными преимуществами, включая бесконтактное поддержание, высокую точность и долговечность. Эти свойства делают их особенно полезными для высокоточных и высокоскоростных операций в станкостроении и других сферах промышленности. Однако использование данной технологии сопряжено с вызовами, такими как высокая стоимость, сложность управления и энергозависимость.

Перспективы развития технологии заключаются в применении новых материалов, таких как высокотемпературные сверхпроводники, и внедрении передовых алгоритмов управления, включая машинное обучение. Эти достижения могут значительно снизить эксплуатационные затраты и повысить стабильность работы систем, открывая новые горизонты для их использования. Несмотря на существующие ограничения, активные магнитные подшипники продолжают эволюционировать, и их потенциальные преимущества оправдывают усилия по развитию и исследованию этой технологии.

Библиографический список

1. Sahinkaya A., Computational Cost Reduction of MIMO Controllers for Active Magnetic Bearing Systems/ A. Sahinkaya, L. Hawkins, T. Sawicki //Journal of Engineering for Gas Turbines and Power. – 2020. Vol.142.
2. Zhong W. A Review of Active Magnetic Bearings Supported Systems Optimization Design / W. Zhong // International Journal of Magnetics and Electromagnetism. – 2020, Vol. 6.
3. Lijesha K.P. Failure Mode and Effect Analysis of Active Magnetic Bearings / K.P. Lijesha, H. Hiranania // Engineering Failure Analysis. – 2016. P. 62.
4. Sanket Kumar A., Magnetic nanoparticles: Magnetic nano-technology using biomedical applications and future prospects / Sanket Kumar A., Nayak, K. // International Journal of Pharmaceutical Sciences Review and Research. – 2015. P. 119–131.
5. Богданова Ю.В., Синергетическое управление магнитными подшипниками ротора искусственного желудочка сердца / Ю.В. Богданова, А.М. Гуськов // Медицинская техника. – 2016, №3, С. 5-8.
6. Ekta Sharma, Evolution in Lithography Techniques: Microlithography to Nanolithography / Ekta Sharma, Jaya Misharwal, Bhavya Sinhmar, Reena Rathi // Nanomaterials. – 2022. Vol.12.

© Ильясов Д.Р., Шарафутдинов Ш.Н., 2024

Л.И. ЛЕВЧЕНКО

levchenko.li@ugatu.su

Науч. руковод. – канд. техн. наук, доц. **И.И. ЯМАЛОВ**

Уфимский университет науки и технологий

ОБЗОР ТЕКУЩИХ РЕШЕНИЙ ДЛЯ МОДЕЛИРОВАНИЯ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В СИСТЕМАХ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ ЛЕТАТЕЛЬНЫХ АППАРАТОВ

Аннотация: переходные процессы в системах электроснабжения летательных аппаратов могут привести к нежелательным последствиям, таким как снижение качества электроэнергии, перегрузка оборудования и даже аварийные ситуации. В данной работе рассматриваются текущие решения для моделирования переходных процессов в системах электроснабжения летательных аппаратов.

Ключевые слова: моделирование переходных процессов, системы электроснабжения, летательные аппараты, MATLAB/Simlink, ANSYS.

В современном мире системы электроснабжения летательных аппаратов играют ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности полётов. Они представляют собой сложные технические комплексы, которые требуют тщательного анализа и моделирования для обеспечения надёжной работы.

Переходные процессы в системах электроснабжения могут возникать из-за различных факторов, таких как изменение нагрузки, переключение оборудования, короткие замыкания и другие. Эти процессы могут привести к нежелательным последствиям, таким как снижение качества электроэнергии, перегрузка оборудования и даже аварийные ситуации.

Для предотвращения негативных последствий переходных процессов необходимо проводить их моделирование с использованием современных методов и инструментов. В данной статье будут рассмотрены текущие решения для моделирования переходных процессов в системах электроснабжения летательных аппаратов.

Моделирование переходных процессов в системах электроснабжения летательных аппаратов — это процесс создания и анализа математических моделей, которые описывают динамическое поведение систем электроснабжения (СЭС) при изменении их состояний. [1] Это включает в себя анализ поведения системы при переходах от одного режима работы к другому, таких как включение или отключение нагрузок, изменение уровня напряжения или частоты, а также реакцию системы на различные типы сбоев и аварийных ситуаций. Целью моделирования переходных процессов является оценка стабильности, надёжности и эффективности СЭС в различных условиях эксплуатации, а также разработка методов управления и контроля для обеспечения безопасной и эффективной работы системы.

Моделирование происходит в несколько этапов:

- Постановка задачи: определение цели моделирования, объекта и его основных свойств.
- Формализация задачи: создание формализованной модели, то есть запись на формальном языке.
- Разработка компьютерной модели: выбор инструмента моделирования и создание программы или алгоритма.
- Компьютерный эксперимент: тестирование и исследование модели.
- Анализ результатов: оценка соответствия результатов моделирования поставленной задаче. [2]

Одним из подходов к моделированию переходных процессов являются модульные модели. Они позволяют рассматривать систему как совокупность отдельных компонентов, каждый из которых можно моделировать и анализировать независимо. Это упрощает процесс моделирования и позволяет легко вносить изменения и расширять систему. Их основное преимущество – это возможность использования моделей с различной степенью детализации в зависимости от уровня анализа (например, функциональный или поведенческий уровень).

Также широко используется метод линеаризации, который представляет собой упрощение анализа нелинейных систем. Это позволяет применять методы линейного анализа и управления для оценки стабильности и поведения системы. Линеаризация проводится вокруг рабочей точки системы, что позволяет использовать линейные модели для анализа малых отклонений.

Также для решения задач исследования переходных процессов часто применяется программное обеспечение. Примером может послужить использование MATLAB/Simulink, так как это мощная платформа для моделирования, симуляции и анализа динамических систем, включая системы электроснабжения летательных аппаратов. Она широко используется в авиационной промышленности для разработки и тестирования различных компонентов и систем [3]. Для анализа переходных процессов имеется возможность создать различные сценарии симуляции, которые моделируют различные условия эксплуатации системы. Это может включать включение и отключение нагрузок, изменение уровня напряжения или частоты, а также моделирование аварийных ситуаций. На рис. 1 представлена модель блока управления генератором в данном программном обеспечении.

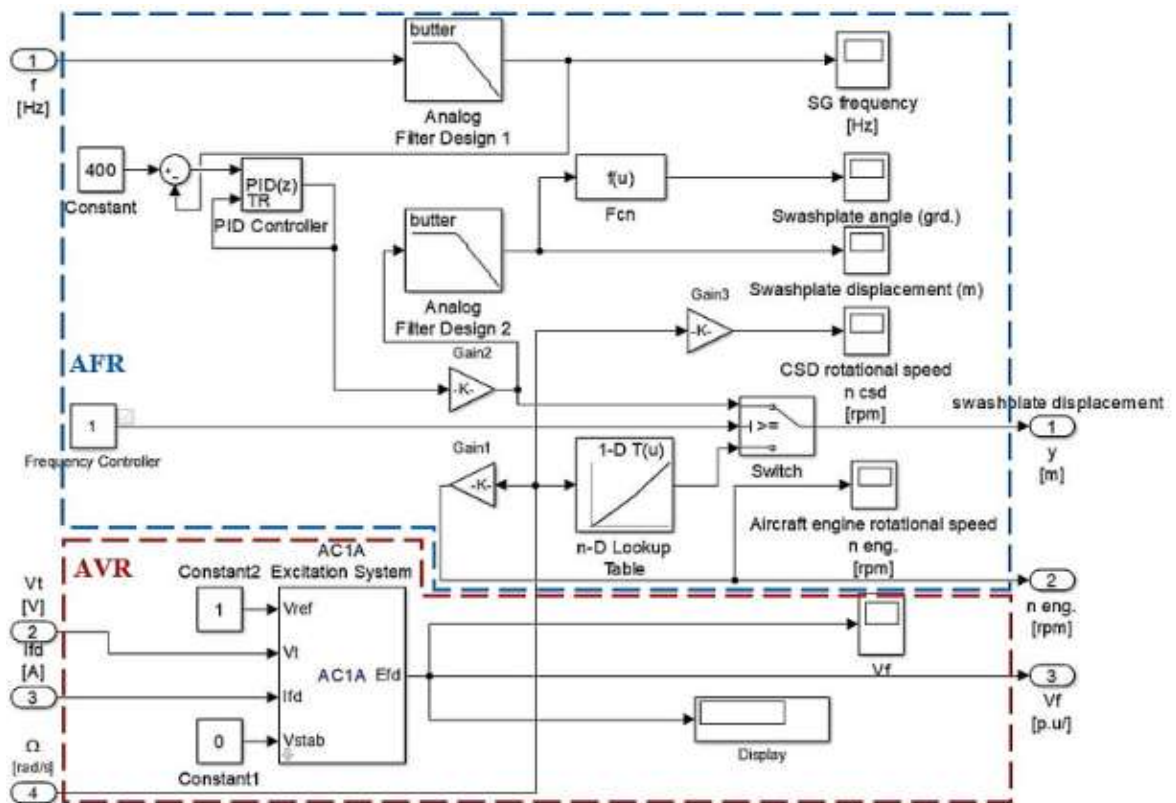


Рис. 1. Модель блока управления генератором в MATLAB/Simulink

После завершения симуляции необходимо проанализировать результаты для оценки поведения системы. Это включает анализ переходных процессов, таких как время установления, амплитуда колебаний, частота и т.д. В MATLAB можно использовать различные инструменты для анализа данных, такие как функции обработки сигналов, спектральный анализ, статистический анализ и т.д. Результаты симуляции можно экспортировать в MATLAB для дальнейшего анализа и визуализации. В дальнейшем, на основе анализа результатов можно оптимизировать модель для улучшения её точности и производительности. Это может включать изменение параметров компонентов, добавление новых компонентов или изменение структуры модели. В MATLAB/Simulink можно использовать различные методы оптимизации, такие как генетические алгоритмы, методы градиентного спуска и т.д. Валидация модели может включать сравнение результатов симуляции с экспериментальными данными или известными результатами.

Также не стоит забывать про ANSYS — программное обеспечение для моделирования, симуляции и анализа различных инженерных систем, включая системы электроснабжения летательных аппаратов. ANSYS предоставляет широкий спектр инструментов для анализа механических, тепловых, электромагнитных и других физических процессов. Возможность создания геометрической модели системы электроснабжения летательного аппарата, моделирование физических компонентов, таких как генераторы, преобразователи мощности, аккумуляторы, проводка и нагрузки помогает в решении задач, связанных с анализом и оптимизацией электрических, тепловых и механических характеристик системы. Это позволяет инженерам и исследователям проводить

детальные симуляции и анализ поведения системы в различных условиях эксплуатации, включая переходные процессы, возникающие при изменении нагрузок, режимов работы и аварийных ситуациях. ANSYS предоставляет широкий спектр инструментов для анализа различных физических процессов, таких как электромагнитные, тепловые и механические. Это позволяет проводить комплексный анализ системы электроснабжения, учитывая взаимодействие различных физических явлений [4]. На рис. 2 представлено моделирование тепловыделение силовых ключей при переключении.

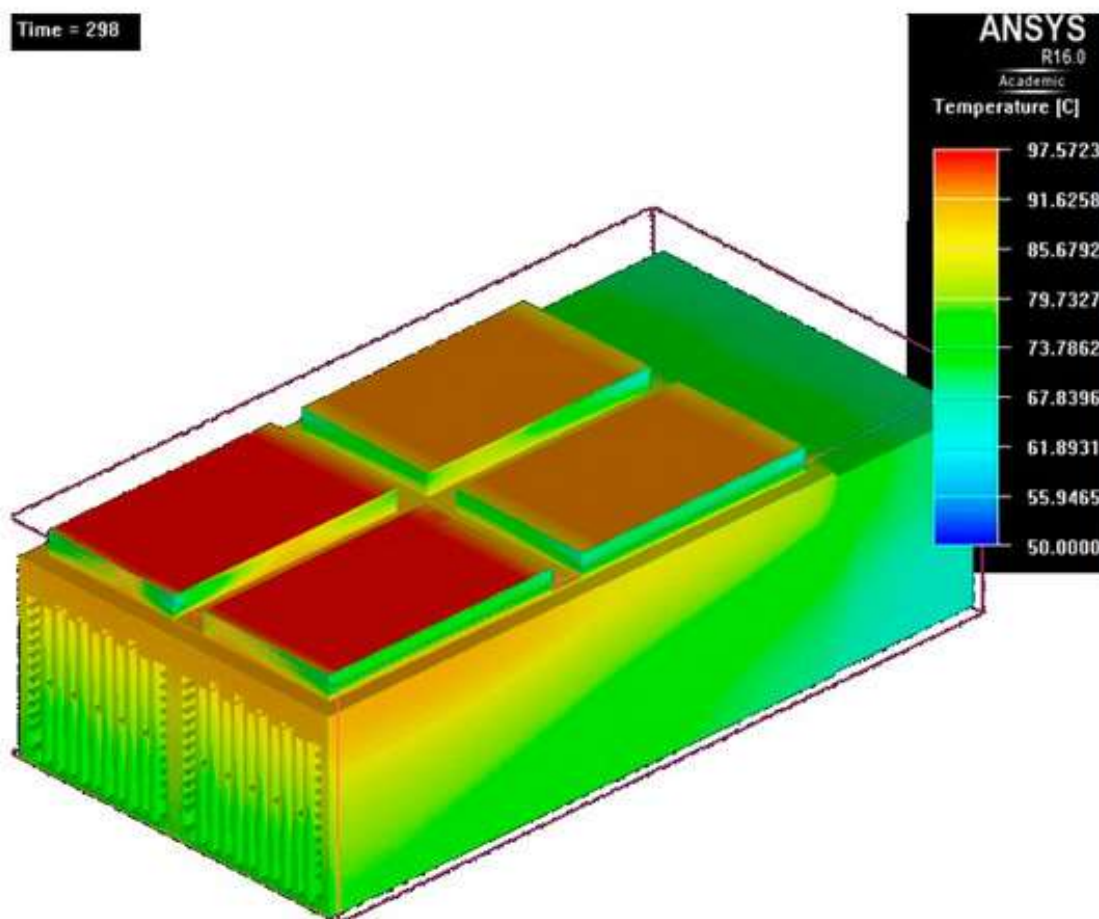


Рис. 2. Расчёт тепловыделения силовых ключей при переключении в ANSYS

Моделирование переходных процессов в системах электроснабжения летательных аппаратов является критически важным аспектом для обеспечения их безопасной и эффективной работы. Современные решения для моделирования этих процессов включают использование модульных моделей, методов линеаризации и программного обеспечения, такого как MATLAB/Simulink и ANSYS. Эти инструменты позволяют создавать точные и детализированные модели, которые помогают анализировать поведение системы в различных условиях эксплуатации, включая переходные процессы, возникающие при изменении нагрузок, режимов работы и аварийных ситуациях. Использование современных методов и инструментов для моделирования и анализа переходных процессов в системах электроснабжения летательных аппаратов позволяет обеспечить их стабильную и

надежную работу в различных условиях эксплуатации. Это важно для предотвращения негативных последствий переходных процессов и обеспечения высокого уровня безопасности и эффективности полётов.

Библиографический список

1. Schefer H. Discussion on Electric Power Supply Systems for All Electric Aircraft / H. Schefer, L. Fauth, T. H. Kopp, R. Mallwitz, J. Friebe, M. Kurrat // IEEE Access. – 2020. – Vol. 8, P. 84188–84216. doi: 10.1109/ACCESS.2020.2991804
2. Siebke K. Operation mode analysis of the CLLC resonant converter / K. Siebke, R. Mallwitz // Proc. IEEE 13th Int. Conf. Compat. Power Electron. Power Eng. (CPE-POWERENG). – 2019. P. 1–6.
3. Lang X. Stability improvement of on-board HVDC grid and engine using an advanced power generation center for the more-electric aircraft / X. Lang // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2022. – Vol. 8, № 1, P. 660–674.
4. Li X. Component Modeling and System Level Simulation of Aircraft Electrical Systems / X. Li // Engineering Letters. – 2016. – Vol. 24. №. 2.

© Левченко Л.И., 2024

СОДЕРЖАНИЕ

Секция 4. Электротехнические комплексы и системы.....	3
<i>Алюшев В.Р.</i> Применение беспилотных подводных аппаратов в современном мире	3
<i>Барабанов К.А., Левченко Л.И.</i> Применение статоров с обмоткой на печатной плате в синхронных двигателях с постоянными магнитами: обзор современного состояния и перспективы развития.....	7
<i>Галиев Р.Д.</i> Выбор электродвигателей для робототехнических систем: особенности и рекомендации.....	13
<i>Иванов М.В.</i> Интегрированный стартер-генератор легкомоторного самолета.....	19
<i>Иванов М.В., Хамзин Ф.С.</i> Оценка напряженно-деформированного состояния банджа электрической машины с постоянными магнитами.....	25
<i>Панов Н.В., Матвеев В.С., Хазиев В.В.</i> К вопросу выбора постоянного магнита и материала обмотки статора для стартер-генератора, интегрированного в газотурбинный двигатель.....	31
<i>Шакуров Д.И., Савиных А.А.</i> Изготовление лабораторного образца электродвигателя фарадея в целях демонстрации.....	34
<i>Султанов А.М.</i> К вопросу об электромагнитной совместимости блоков управления летательных аппаратов.....	38
<i>Татауров А.И.</i> Мониторинг и оптимизация параметров работы электрической машины с применением сверточных нейронных сетей.....	43
<i>Хилажесев Т.И.</i> Блокчейн и РЗА: устранение уязвимостей и гарантии безопасности.....	49
<i>Шарафутдинов Ш.Н., Ильясов Д.Р.</i> Классификация магнитных опор.....	53
<i>Султангареев Д.У.</i> Применение современных электрических машин в авиации.....	59
<i>Мухаматуллин Н.Р., Шарафутдинов Э.Д., Козлов В.А.</i> Разработка и исследование двигателя Фарадея.....	63
<i>Мулюков А.А., Ахмадеев А.Р.</i> Исследование принципа работы электрогенератора.....	67
<i>Зиганшин А.А., Сиразитдинов О.Б.</i> Исследование одного из режимов «4-х ключевой коммутации» пятифазной электромеханической системы.....	72
<i>Нагорнов А.С.</i> Перспективы развития солнечной энергетики.....	78
<i>Ялаев У.Н., Шипуль Р.С., Тухватшин Р.А.</i> Двигатели постоянного и переменного тока.....	82
<i>Ильясов Д.Р., Шарафутдинов Ш.Н.</i> Тенденции развития технологии магнитных подшипников.....	87
<i>Левченко Л.И.</i> Обзор текущих решений для моделирования переходных процессов в системах электроснабжения летательных аппаратов.....	91

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

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

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.

Научное издание

МАВЛЮТОВСКИЕ ЧТЕНИЯ

Том 4

Материалы XVIII Всероссийской молодёжной научной конференции

(г. Уфа, 25 – 29 ноября 2024 г.)

Электронное издание сетевого доступа

*За достоверность информации, изложенной в статьях,
ответственность несут авторы.*

Статьи публикуются в авторской редакции

Подписано к использованию 27.12.2024 г.
Гарнитура «Times New Roman». Объем 4,46 Мб.
Заказ 280.

*ФГБОУ ВО «Уфимский университет науки и технологий»
450008, Башкортостан, г. Уфа, ул. Карла Маркса, 12.*

Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: ric-bdu@yandex.ru