

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

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРОНИКА



Уфа 2021

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

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ УСТРОЙСТВА И ЭЛЕКТРОНИКА

*Допущено Редакционно-издательским советом УГАТУ
в качестве практикума для студентов всех форм обучения, обучающихся по направлениям
подготовки: бакалавров 13.03.01 Теплоэнергетика и теплотехника, 13.03.03
Энергетическое машиностроение, 15.03.01 Машиностроение, 15.03.02 Технологические
машины и оборудование, 15.03.04 Автоматизация технологических процессов
и производств, 15.03.05 Конструкторско-технологическое обеспечение
машиностроительных производств, 15.03.06 Мехатроника и робототехника,
20.03.01 Техносферная безопасность, 22.03.01 Материаловедение и технологии материалов,
23.03.01 Технология транспортных процессов, 24.03.04 Авиастроение, 24.03.05 Двигатели
летательных аппаратов, 25.03.01 Техническая эксплуатация летательных аппаратов
и двигателей, 27.03.01 Стандартизация и метрология, 27.03.03 Системный анализ
и управление, 27.03.04 Управление в технических системах, 27.03.05 Инноватика,
28.03.02 Наноинженерия и специалистов 09.05.01 Применение и эксплуатация
автоматизированных систем специального назначения, 15.05.01 Проектирование
технологических машин и комплексов, 20.05.01 Пожарная безопасность,
24.05.02 Проектирование авиационных и ракетных двигателей,
27.05.01 Специальные организационно-технические системы*

Учебное электронное издание сетевого доступа

© УГАТУ
ISBN 978-5-4221-1541-9

Уфа 2021

Авторы: И. В. Вавилова, П. А. Грахов, Т. М. Крымская, О. В. Мельничук,
Р. Г. Фаррахов

Рецензенты:

*профессор каф. электроснабжения и автоматизации технологических процессов
ФГБОУ ВО «БашГАУ» д-р техн. наук Р. Р. Галиуллин;
начальник отдела электротехнического оборудования Департамента электрических
сетей ООО «Башкирэнерго» И. А. Хайруллин*

Электромагнитные устройства и электроника : практикум
[Электронный ресурс] / [Вавилова И. В. и др.] ; Уфимск. гос. авиац. техн. ун-т.
– Уфа : УГАТУ, 2021. – URL: https://www.ugatu.su/media/uploads/MainSite/Ob%20universitete/Izdateli/El_izd/2021-185.pdf

Содержит краткие теоретические сведения и расчеты эксплуатационных характеристик трансформаторов, электрических машин постоянного и переменного токов, а также вопросы расчета и моделирования электронных схем. Соответствует требованиям, предъявляемым основными профессиональными образовательными программами подготовки бакалавров и специалистов к содержанию дисциплин «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электротехника», «Электротехника. Электроника», «Электротехника, электроника и схемотехника».

Предназначен для организации работы во время аудиторных практических занятий под руководством преподавателя, а также для работы в дистанционном формате. Может быть использован студентами всех форм обучения при самостоятельной работе.

При подготовке электронного издания использовались следующие программные средства:

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

Авторы: *Вавилова Ирина Владимировна*
Грахов Павел Анатольевич
Крымская Татьяна Махмутовна
Мельничук Ольга Васильевна
Фаррахов Рузиль Галиевич

Корректурa и верстка *О. А. Соколова*
Программирование и компьютерный дизайн *О. М. Толкачёва*

Подписано к использованию: 31.08.2021
Объем: 1,48 Мб.

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный авиационный технический университет»
450008, Уфа, ул. К. Маркса, 12.
Тел.: +7-908-35-05-007
e-mail: rik@ugatu.su

Все права на размножение, распространение в любой форме остаются за разработчиком.
Нелегальное копирование, использование данного продукта запрещено.

ВВЕДЕНИЕ

Практикум является составной частью рабочей программы дисциплин: «Электротехника и электроника», «Общая электротехника и электроника», «Электротехника», «Электротехника. Электроника», «Электротехника, электроника и схемотехника», «Основы электротехники», «Основы электротехники в машиностроении». Все перечисленные дисциплины имеют примерно одинаковую структуру и содержание, поэтому представлены наиболее часто встречающимся названием «Электротехника и электроника». Объем дисциплины варьируется в зависимости от направления – от 3 до 6 зачетных единиц.

Практикум охватывает вторую и третью части дисциплины «Электромагнитные устройства» и «Электроника», предназначен как для организации индивидуальной работы студентов во время аудиторных практических занятий под руководством преподавателя, при проведении занятия в дистанционном формате, так и при самостоятельной работе дома. Подход к подобному проведению практических занятий основан на многолетней апробированной методике, доказавшей свою эффективность.

Содержание практикума соответствует требованиям, предъявляемым Федеральными государственными образовательными стандартами высшего образования (3++) (ФГОС ВО) с учетом профессиональных стандартов.

Для большинства бакалавров и специалистов в результате освоения программы у выпускника должен быть сформирован ряд универсальных, общепрофессиональных и профессиональных компетенций.

Дисциплина «Электротехника и электроника» не является профильной для неэлектротехнических направлений, поэтому при ее изучении принят *пороговый уровень освоения компетенций*, который дает общее представление о виде деятельности, основных закономерностях функционирования объектов профессиональной деятельности, методов и алгоритмов решения практических задач.

Для приобретения соответствующих компетенций в данном разделе дисциплины обучающийся должен освоить следующие индикаторы компетенций:

знать: принцип действия, свойства и характеристики электромагнитных и электронных устройств;

уметь: читать электротехнические схемы, содержащие электромагнитные и электронные устройства; рассчитывать основные величины, характеризующие эти устройства;

владеть навыками: практического расчета эксплуатационных характеристик электромагнитных и электронных устройств с помощью справочной литературы.

Дисциплина «Электротехника и электроника» относится, в большинстве учебных планов, к базовой части профессионального цикла дисциплин, определяющих теоретический уровень подготовки дипломированного выпускника – бакалавра и специалиста.

Целью освоения дисциплины является обеспечение теоретической и практической подготовки в области электротехники и электроники; развитие технического мышления; приобретение знаний, необходимых для изучения специальных дисциплин, связанных с эксплуатацией электротехнического оборудования; овладение знаниями, умениями и владения навыками, необходимыми для квалифицированного использования электротехнических и электронных устройств в энергетических установках и технологическом оборудовании.

Данное издание содержит материал для шести практических занятий. В начале каждого занятия в виде справочных данных представлены краткие теоретические сведения, далее приведены подробные решения задач разного уровня сложности. Для индивидуализации работы студентов во время аудиторного занятия эти задачи дополнены несколькими вариантами числовых значений.

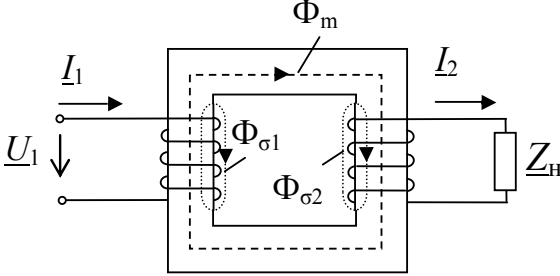
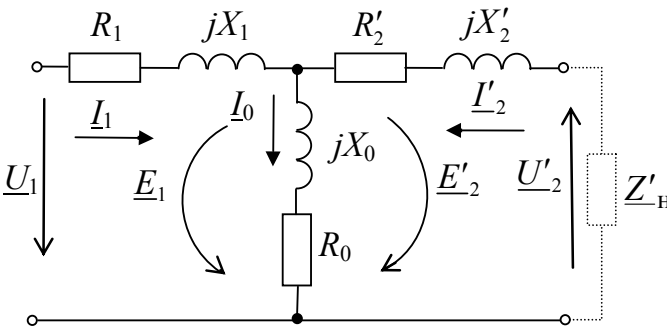
Практикум призван помочь студентам в освоении дисциплины при выполнении расчетно-графических работ (РГР), контролируемой самостоятельной работы (КСР), подготовке к промежуточной аттестации (зачет или экзамен).

Практическое занятие №1

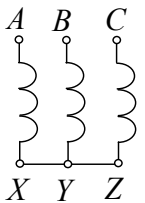
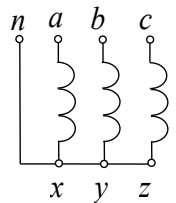
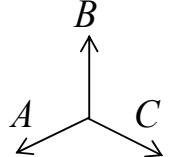
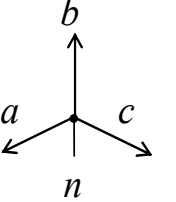
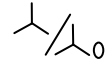
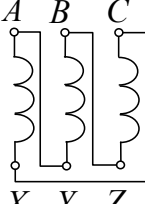
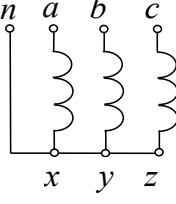
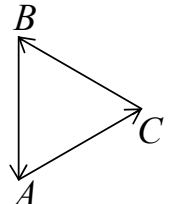
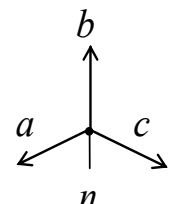

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

1.1. Краткие теоретические сведения

1.1.1. Однофазный трансформатор

<p>Электромагнитная схема</p> 	$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m,$ $E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m,$ $\Phi_m = \frac{U_1}{(4,44 f w_1)} = \frac{U_2}{(4,44 f w_2)},$ $\Phi = B \cdot S;$ $n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1}.$
<p>Схема замещения трансформатора</p>  <p>Уравнения электрического состояния нагруженного трансформатора:</p> $\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1;$ $\underline{U}_2 = \underline{E}_2 - R_2 \underline{I}_2 - jX_2 \underline{I}_2.$ <p>Уравнение магнитного состояния трансформатора:</p> $\underline{I}_0 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \cdot \frac{w_2}{w_1}.$	<p>Параметры ветви намагничивания:</p> $P_0 = I_0 U_{1н} \cos \varphi_0; \quad i_0 = \frac{I_0}{I_{1н}} \cdot 100\%;$ $R_0 = Z_0 \cos \varphi_0 = \frac{P_0}{I_0^2};$ $Z_0 = \frac{U_{1н}}{I_0}; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}.$ <p>Параметры продольной ветви:</p> $P_k = I_{1н} U_k \cos \varphi_k; \quad u_k = \frac{U_k}{U_{1н}} \cdot 100\%;$ $R_k = Z_k \cos \varphi_k = \frac{P_k}{I_{1н}^2};$ $Z_k = \frac{U_{1к}}{I_{1н}}; \quad X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$ $R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2}.$
<p>Внешняя характеристика и КПД трансформатора:</p> $\Delta u_2 = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100\% = \beta (u_a \cos \varphi_2 + u_p \sin \varphi_2) = \beta u_k \cos (\varphi_2 - \varphi_k), \%;$ $\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{p_{\sigma 1} + p_{\sigma 2} + p_x}{P_2 + p_{\sigma 1} + p_{\sigma 2} + p_x}; \quad \eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0},$ <p>где $\beta = \frac{I_2}{I_{2н}} = \frac{I_1}{I_{1н}}$; $\beta_{\eta \rightarrow \max} = \sqrt{P_0 / P_k}$.</p>	

1.1.2. Трехфазные трансформаторы

Схемы обмоток		соединения		Диаграммы векторов		Условные обозначения	
ВН		НН		ВН		НН	
					звезда/звезда с нулем		
					треугольник/звезда с нулем		

1.2. Типовые задачи

Задача 1.1.

Однофазный трансформатор ОС-10/0,66 УЗ 400/230 характеризуется следующими техническими данными.

Таблица 1.1

Тип трансформатора	$S_{н\tau}$, кВА	$U_{1н\tau}$, кВ	$U_{2н\tau}$, кВ	i_0 , %	u_k , %	P_0 , Вт	P_k , Вт
ОС-10/0,66 УЗ 400/230	10,0	0,4	0,23	6	2	60	180

Рассчитайте параметры и постройте Т-образную схему замещения. Принять, что в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и вторичной обмотками.

Определите процентное изменение напряжения на вторичной обмотке трансформатора и напряжение на вторичной обмотке при коэффициентах нагрузки $\beta=0,05; 0,5; 1,0$ и коэффициенте мощности приемника $\cos\varphi_2=0,8$ (нагрузка активно-индуктивная). Постройте внешнюю характеристику.

Решение

Параметры схемы замещения (рис. 1.1) определяют из опытов холостого хода и короткого замыкания.

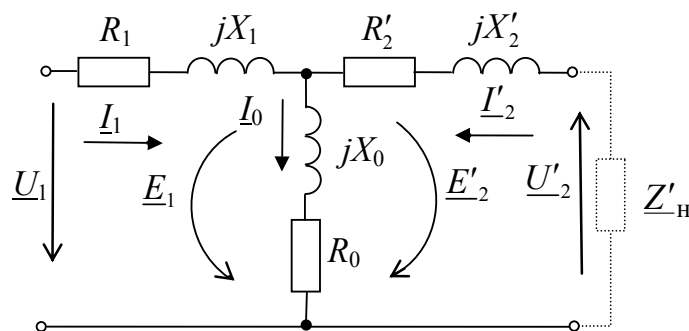


Рис. 1.1

Номинальные токи трансформатора

$$I_{1н} = S_{н} / U_{1н} = 10 \cdot 10^3 / 0,4 \cdot 10^3 = 25 \text{ А};$$

$$I_{2н} = S_{н} / (U_{2н}) = 10 \cdot 10^3 / (0,23 \cdot 10^3) = 43,5 \text{ А}.$$

Построим T-образную схему замещения однофазного трансформатора ОС-10/0,66 УЗ 400/230, паспортные данные которого приведены в табл. 1.1

Номинальные напряжения, указанные в паспортных данных трансформатора – это напряжения в режиме холостого хода, так как они близки к значениям ЭДС обмоток и позволяют наиболее точно вычислить коэффициент трансформации.

Величины сопротивлений X_0 и R_0 намагничивающей ветви схемы замещения определяются по результатам опыта *холостого хода* (ХХ).

В опыте ХХ первичная обмотка трансформатора присоединяется к источнику переменного тока напряжением $U_{1н}$, а вторичная цепь трансформатора размыкается, т.е. $I_2 = 0$. Под действием приложенного напряжения U_1 в первичной цепи протекает ток I_0 , называемый током холостого хода.

Ток I_0 очень мал и обычно не превышает нескольких процентов от номинального первичного тока. Поэтому с большой степенью точности падением напряжения на активном и реактивном сопротивлениях первичной обмотки можно пренебречь, а уравнение электрического состояния записать как:

$$\underline{U}_{1н} = -\underline{E}_1.$$

Следовательно, схема замещения в опыте ХХ имеет вид (рис. 1.2).

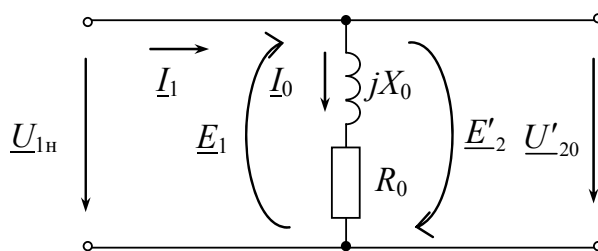


Рис. 1.2

Ток *холостого хода* первичной обмотки (I_0) выражают в процентах по отношению к номинальному первичному току I_{1H} , и эта величина i_0 относится к «паспортным» параметрам трансформатора.

Ток *холостого хода* первичной обмотки

$$I_0 = (i_0 \cdot I_{1H}) / 100\% = (6\% \cdot 25) / 100\% = 1,5 \text{ А.}$$

Активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме ХХ, расходуется главным образом на магнитные потери (потери в стали), так как при небольшом токе холостого хода потери в меди первичной обмотки незначительны, т.е. $P_0 \approx P_{ст}$.

$$R_0 = P_0 / (I_0)^2 = 60 / (1,5)^2 = 26,7 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление ветви намагничивания Z_0

$$Z_0 = U_{1H} / I_0 = (0,4 \cdot 10^3) / 1,5 = 266,7 \text{ Ом.}$$

Тогда сопротивление X_0

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{266,7^2 - 26,7^2} = 265,3 \text{ Ом.}$$

В опыте холостого хода определяется коэффициент трансформации

$$n = \frac{U_{1H}}{U_{2H}} = \frac{400}{230} = 1,74.$$

Величины сопротивлений «продольной» ветви схемы замещения $R_k = R_1 + R'_2$ и $X_k = X_1 + X'_2$ определяются по результатам *опыта короткого замыкания (КЗ)*.

Под опытом короткого замыкания (КЗ) трансформатора понимается такой режим, при котором его вторичная обмотка при испытании замкнута накоротко, а к первичной обмотке подводится пониженное напряжение, называемое напряжением короткого замыкания U_k , при этом в обмотках протекают номинальные токи I_{1H} и I_{2H} .

Напряжение в опыте короткого замыкания $U_{1к}$

$$U_k = (u_k \cdot U_{1н}) / 100\% = (0,4 \cdot 10^3 \cdot 2\%) / 100\% = 8 \text{ В.}$$

Мощность, измеряемая в первичной цепи в режиме короткого замыкания, равна приблизительно номинальным электрическим потерям на нагрев обмоток трансформатора $P_k = P_{обм}$.

Мощностью потерь в стали $P_{ст}$ (пропорциональных величине магнитного потока) можно пренебречь, так как U_1 мало, следовательно, мал и рабочий магнитный поток, пропорциональный этому напряжению.

Намагничивающая составляющая тока первичной обмотки в опыте короткого замыкания пренебрежительно мала, следовательно, схему замещения с большой степенью точности можно представить в виде (рис. 1.3).

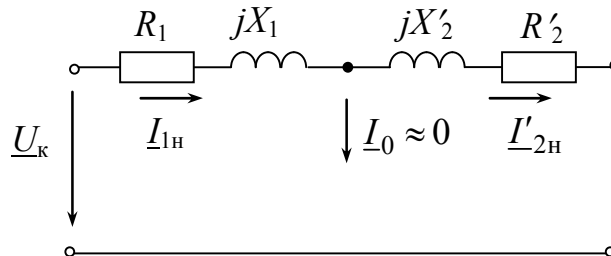


Рис. 1.3

Параметры продольной ветви схемы замещения

$$R_k = R_1 + R'_2 = \frac{P_k}{(I_{1н})^2} = \frac{0,18 \cdot 10^3}{25^2} = 0,288 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление Z_k

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1н}} = \frac{8}{25} = 0,32 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление от потоков рассеяния

$$X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{0,32^2 - 0,288^2} = 0,139 \text{ Ом.}$$

Принимая, что в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и вторичной обмотками, можно определить параметры продольной ветви схемы замещения трансформатора как:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{0,288}{2} = 0,144 \text{ Ом;}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_k}{2} = \frac{0,139}{2} = 0,07 \text{ Ом.}$$

Все параметры схемы замещения определены. Т-образная схема замещения представлена на рис. 1.4 (сопротивления заданы в Ом).

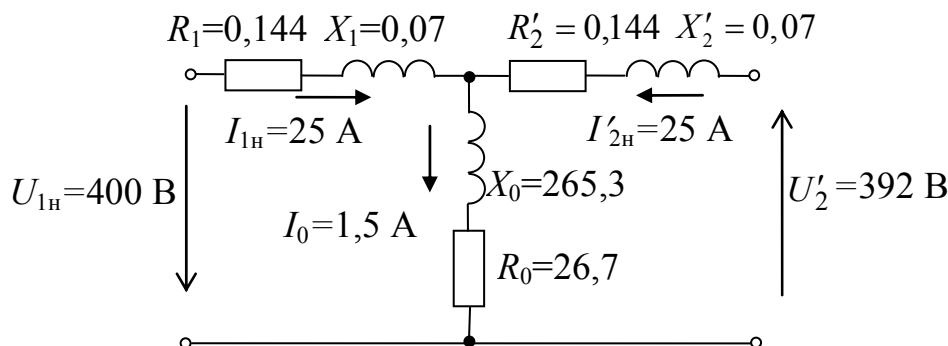


Рис. 1.4

Процентное изменение напряжения Δu_2 в режиме нагрузки определяется по выражению

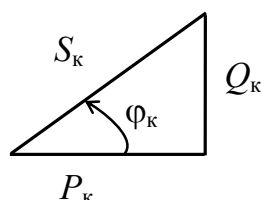
$$\Delta u_2 = \beta u_k \cos(\varphi_2 - \varphi_k), \%$$

где φ_2 – угол определяемый нагрузкой,

$$\varphi_2 = \arccos(0,8) = 36,8^\circ;$$

φ_k – угол сдвига по фазе между напряжением и током в опыте короткого замыкания.

Угол φ_k можно определить из треугольника мощностей в опыте короткого замыкания.



$$\varphi_k = \arccos\left(\frac{P_k}{S_k}\right) = \arccos\left(\frac{P_k}{U_k \cdot I_{1H}}\right) = \arccos\left(\frac{180}{8 \cdot 25}\right) = 25,8^\circ.$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора определяется по выражению

$$U_2 = U_{2H} \left(1 - \frac{\Delta u_2}{100\%}\right).$$

Результаты вычислений Δu_2 и U_2 для различных коэффициентов загрузки приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2

β	0,05	0,5	1,0	1,5
$\Delta u_2, \%$	0,098	0,98	1,96	2,94
$U_2, \text{В}$	229,77	228,74	225,48	223,23

Внешняя характеристика трансформатора представлена на рис. 1.5.

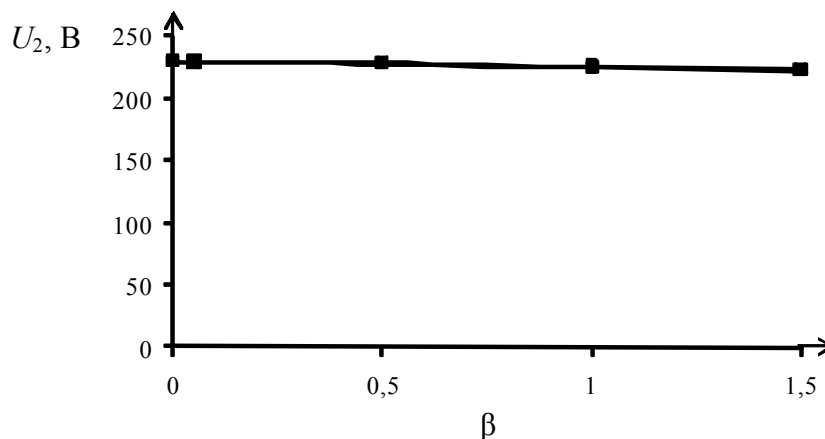


Рис. 1.5

Схема замещения трансформатора (см. рис. 1.4) строится для *номинального режима* работы, величины напряжений и токов указываются для этого режима, причем во вторичной обмотке – значения, приведенные к первичному напряжению с учетом коэффициента трансформации:

– величина приведенного напряжения на вторичной обмотке трансформатора U'_2 – значение U_2 берется из табл. 1.1 при коэффициенте нагрузки $\beta=1$, поэтому его величина отличается от паспортного значения

$$U'_2 = U_2 \cdot n = 225,48 \cdot 1,74 = 392 \text{ , В.}$$

– величина тока вторичной обмотки трансформатора, приведенного к первичному напряжению I'_2 :

$$I'_2 = \frac{I_{2\text{H}}}{n} = \frac{43,5}{1,74} = 25, \text{ А.}$$

Задача 1.2.

Для трехфазного трансформатора, паспортные данные которого приведены в табл. 1.3, рассчитать параметры и построить Т-образную схему замещения одной фазы трансформатора, определить максимальный КПД и в номинальном режиме при коэффициенте мощности приемника $\cos\varphi_2=0,7$. Построить векторную диаграмму.

Таблица 1.3

Тип трансформатора	S_H , кВА	U_{1H} , кВ	U_{2H} , кВ	i_0 , %	u_k , %	P_0 , кВт	P_k , кВт	Способ соединения обмоток
ТСЗ-250/15	250	13,8	0,4	8,0	4,0	1,1	4,4	Y / Δ

Схема замещения трехфазного трансформатора составляется для одной фазы.

При этом следует учитывать следующие особенности расчета:

– номинальная полная мощность трансформатора S_H и мощности потерь – P_0 в опыте холостого хода и P_k в опыте короткого замыкания приходятся на три фазы;

– номинальные фазные напряжения $U_{1Hф}$ и $U_{2Hф}$, а также фазные токи $I_{1Hф}$ и $I_{2Hф}$ определяются в соответствии со способом соединения первичных и вторичных обмоток, так как под номинальными напряжениями понимаются линейные напряжения на зажимах трансформаторов режиме холостого хода.

Решение

Параметры схемы замещения (см. рис. 1.1) определяют из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Рассчитаем и построим Т-образную схему замещения для одной фазы трехфазного трансформатора ТМ-250/10.

Номинальные токи трансформатора (под ними всегда понимаются линейные токи) равны

$$I_{1H} = S_H / (\sqrt{3} U_{1H}) = 250 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 13,8 \cdot 10^3) = 10,46 \text{ А};$$

$$I_{2H} = S_H / (\sqrt{3} U_{2H}) = 250 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 0,4 \cdot 10^3) = 360,84 \text{ А}.$$

Первичная обмотка рассматриваемого трехфазного трансформатора имеет схему соединения «звезда», а вторичная – «треугольник». Следовательно, номинальные фазные напряжения:

$$U_{1\text{нф}} = U_{1\text{н}} / \sqrt{3} = 13,8 \cdot 10^3 / \sqrt{3} = 7,967 \text{ кВ},$$

$$U_{2\text{нф}} = U_{2\text{н}} = 0,4 \cdot 10^3 \text{ В},$$

фазный ток $I_{1\text{нф}}$ при таком способе соединения обмоток равен линейному.

$$I_{1\text{нф}} = I_{1\text{н}};$$

фазный ток $I_{2\text{нф}}$ можно определить как

$$I_{2\text{нф}} = \frac{I_{2\text{н}}}{\sqrt{3}} = \frac{360,84}{\sqrt{3}} = 208,33 \text{ А}.$$

Ток холостого хода первичной обмотки

$$I_0 = (i_0 \cdot I_{1\text{нф}}) / 100\% = (8,0 \cdot 10,46) / 100 = 0,84 \text{ А},$$

и напряжение в опыте короткого замыкания $U_{1\text{к}}$

$$U_{\text{к}} = (U_{1\text{нф}} \cdot u_{\text{к}}) / 100\% = (7,967 \cdot 10^3 \cdot 4,0 \%) / 100\% = 318,7 \text{ В}.$$

Активная мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме ХХ, расходуется главным образом на магнитные потери (потери в стали), так как при небольшом токе холостого хода потери в меди первичной обмотки незначительны, т.е. $P_0 \approx P_{\text{ст}}$.

$$R_0 = (P_0 / 3) / (I_0)^2 = (1,1 \cdot 10^3 / 3) / (0,84)^2 = 520 \text{ Ом}.$$

Полное сопротивление ветви намагничивания Z_0

$$Z_0 = U_{1\text{нф}} / I_0 = (7,967 \cdot 10^3) / 0,84 = 9485 \text{ Ом}.$$

Тогда сопротивление X_0

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} = \sqrt{9485^2 - 520^2} = 9470 \text{ Ом}.$$

Величины сопротивлений «продольной» ветви схемы замещения $R_{\text{к}} = R_1 + R'_2$ и $X_{\text{к}} = X_1 + X'_2$ определяются по результатам опыта короткого замыкания (КЗ).

Под *опытом короткого замыкания* (КЗ) трансформатора понимается такой режим, при котором его вторичная обмотка при испытании замкнута накоротко, а к первичной обмотке подводится пониженное напряжение, называемое напряжением короткого замыкания $U_{1\text{к}}$, при этом в обмотках протекают номинальные токи $I_{1\text{н}}$ и $I_{2\text{н}}$.

Мощность, измеряемая в первичной цепи в режиме короткого замыкания, равна приблизительно номинальным электрическим потерям на нагрев обмоток трансформатора $P_{\text{к}} = P_{\text{обм}}$.

Мощностью потерь в стали $P_{ст}$ (пропорциональных величине магнитного потока) можно пренебречь, так как U_1 мало, следовательно, мал и рабочий магнитный поток, пропорциональный этому напряжению.

Параметры продольной ветви схемы замещения

$$R_k = R_1 + R'_2 = \frac{P_k}{3(I_{1нф})^2} = \frac{4,4 \cdot 10^3}{3 \cdot 10,46^2} = 13,4 \text{ Ом.}$$

Полное сопротивление Z_k

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1нф}} = \frac{318,7}{10,46} = 30,5 \text{ Ом.}$$

Индуктивное сопротивление от потоков рассеяния

$$X_k = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{30,5^2 - 13,4^2} = 27,4 \text{ Ом.}$$

Принимая, что в опыте короткого замыкания мощность потерь делится поровну между первичной и вторичной обмотками, можно определить параметры продольной ветви схемы замещения одной фазы трансформатора как:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_k}{2} = \frac{13,4}{2} = 6,7 \text{ Ом;}$$

$$X_1 = X'_2 = \frac{X_k}{2} = \frac{27,4}{2} = 13,7 \text{ Ом.}$$

Все параметры схемы замещения определены. Т-образная схема замещения представлена на рис. 1.6 (сопротивления заданы в Ом).

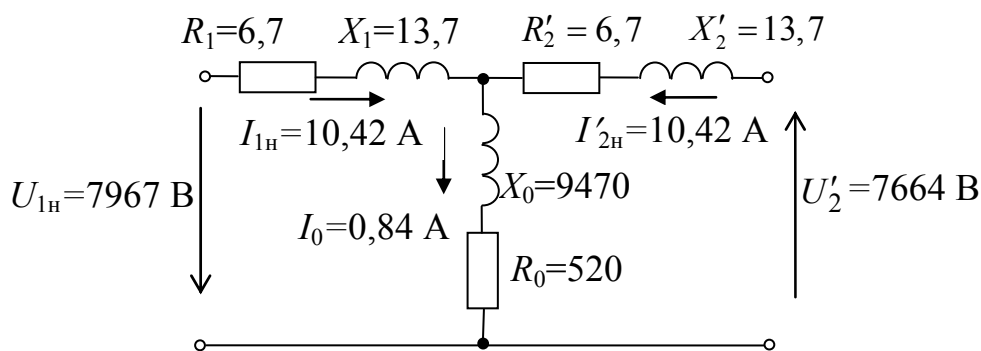


Рис. 1.6

КПД трансформатора определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0}.$$

КПД трансформатора будет максимальным, когда переменные электрические потери равны постоянным магнитным потерям, т.е. при $\beta^2 \cdot P_k = P_0$.

Следовательно β при котором КПД максимальный

$$\beta_{\eta \rightarrow \max} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{1100}{4400}} = 0,5.$$

Максимальный КПД трансформатора

$$\begin{aligned} \eta_{\max} &= \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0} = \\ &= \frac{0,5 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 0,7}{0,5 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 0,7 + 0,5^2 \cdot 4,4 \cdot 10^3 + 1,1 \cdot 10^3} = 0,975. \end{aligned}$$

В номинальном режиме работы трансформатора $\beta=1$.

КПД трансформатора в номинальном режиме

$$\begin{aligned} \eta_{\text{ном}} &= \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0} = \\ &= \frac{1 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 0,7}{1 \cdot 250 \cdot 10^3 \cdot 0,7 + 1^2 \cdot 4,4 \cdot 10^3 + 1,1 \cdot 10^3} = 0,969. \end{aligned}$$

Воспользовавшись схемой замещения приведенного трансформатора, построим векторную диаграмму трансформатора, наглядно показывающую соотношения и фазовые сдвиги между токами, ЭДС и напряжениями трансформатора.

Составим уравнения по законам Кирхгофа (рис. 1.1)

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_0 + (-\underline{I}'_2), \quad (1.1)$$

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1; \quad (1.2)$$

$$\underline{U}'_2 = \underline{E}'_2 - R'_2 \underline{I}'_2 - jX'_2 \underline{I}'_2. \quad (1.3)$$

Построение векторной диаграммы следует начинать с вектора максимального значения основного магнитного потока Φ_m (рис. 1.7).

Вектор тока \underline{I}_0 опережает по фазе вектор магнитного потока Φ_m на угол δ , а ЭДС \underline{E}_1 и \underline{E}'_2 отстают от этого вектора на угол 90° .

Угол магнитных потерь δ определяется как

$$\delta = 90^\circ - \varphi_0.$$

Угол сдвига по фазе между напряжением и током первичной обмотки трехфазного трансформатора в опыте холостого хода определяется через выражение

$$\varphi_0 = \arccos \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1н}I_0} = \arccos \frac{1100}{\sqrt{3} \cdot 13800 \cdot 0,84} = 86,9^\circ,$$

тогда $\delta = 90^\circ - \varphi_0 = 90^\circ - 86,9^\circ = 3,14^\circ$.

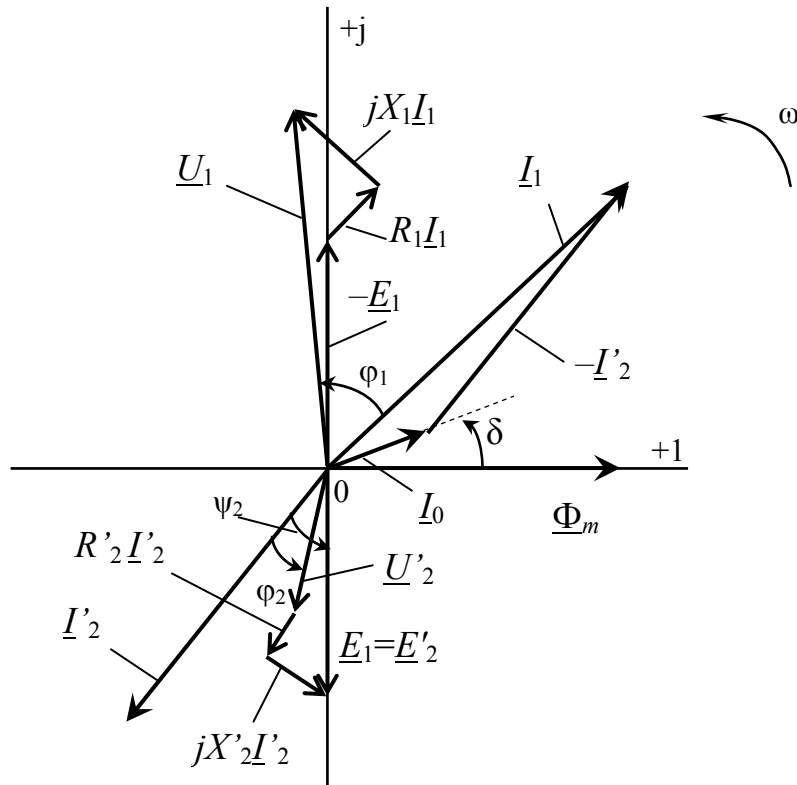


Рис. 1.7

Далее строится вектор тока \underline{I}'_2 . Вектор тока \underline{I}'_2 сдвинут по фазе относительно вектора \underline{E}'_2 , а значит на угол $(\psi_2 + 90^\circ)$ относительно вектора магнитного потока Φ_m . Угол сдвига по фазе между \underline{E}'_2 и \underline{I}'_2 с учетом характера нагрузки равен

$$\psi_2 = \arctg \frac{X'_2 \pm X'_H}{R'_2 + R'_H}.$$

Сопrotивление приемника ($\underline{Z}_H = R_H \pm j \cdot X_H = Z_H e^{j\varphi_2}$) определяется по закону Ома

$$Z_H = \frac{U_2}{I_{2нф}}.$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора (U_2) определяется по процентному изменению напряжения Δu_2 в режиме нагрузки:

$$U_2 = U_{2н} \left(1 - \frac{\Delta u_2}{100\%} \right).$$

Процентное изменение напряжения Δu_2 в режиме нагрузки определяется по выражению:

$$\Delta u_2 = \beta u_k \cos(\varphi_2 - \varphi_k), \%$$

где $\varphi_2 = \arccos(\cos \varphi_2)$ – угол, определяемый нагрузкой:

$$\varphi_2 = \arccos(0,7) = 45,6^\circ;$$

φ_k – угол сдвига по фазе между напряжением и током в опыте короткого замыкания.

Угол φ_k можно определить из треугольника сопротивлений в опыте короткого замыкания,

$$\varphi_k = \arctg\left(\frac{X_k}{R_k}\right) = \arctg\left(\frac{27,4}{13,4}\right) = 63,9^\circ.$$

Тогда

$$\Delta u_2 = \beta u_k \cos(\varphi_2 - \varphi_k) = 1 \cdot 4,0 \cdot \cos(45,6 - 63,9) = 3,8\%,$$

$$U_2 = U_{2н} \left(1 - \frac{\Delta u_2}{100\%} \right) = 400 \left(1 - \frac{3,8\%}{100\%} \right) = 384,8, \text{ В.}$$

Сопротивление приемника (нагрузки)

$$Z_n = \frac{U_2}{I_{2нф}} = \frac{384,8}{208,3} = 1,85, \text{ Ом,}$$

откуда определяются активная и реактивная (с учетом характера нагрузки) составляющие сопротивления:

$$R_n = Z_n \cdot \cos \varphi_2 = 1,85 \cdot \cos 45,6 = 1,3 \text{ Ом,}$$

$$X_n = Z_n \cdot \sin \varphi_2 = 1,85 \cdot \sin 45,6 = 1,32 \text{ Ом.}$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$n_\phi = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{7967}{400} = 20.$$

Приведенные значения сопротивлений приемника определяются по выражениям

$$R'_n = R_n \cdot n_\phi^2 = 1,3 \cdot 20^2 = 520 \text{ Ом,}$$

$$X'_H = X_H \cdot n_\Phi^2 = 1,32 \cdot 20^2 = 528 \text{ Ом.}$$

Тогда при активно-индуктивной нагрузке

$$\psi_2 = \arctg \frac{X'_2 + X'_H}{R'_2 + R'_H} = \arctg \frac{13,7 + 528}{6,7 + 520} = 45,8^\circ.$$

Таким образом, вектор тока \underline{I}'_2 откладывается по углом $(\psi_2 + 90^\circ) = 135,8^\circ$ к вектору магнитного потока Φ_m .

Величина тока вторичной обмотки трансформатора, приведенного к первичному напряжению (I'_2) определяется с учетом коэффициента трансформации:

$$I'_2 = \frac{I_{2\Phi}}{n_\Phi} = \frac{208,33}{20} = 10,42, \text{ А.}$$

Согласно уравнению (1.1), составленному по первому закону Кирхгофа (рис. 1.1), вектор тока первичной обмотки (\underline{I}_1) строится как результат сложения векторов \underline{I}_0 и $(-\underline{I}'_2)$ (рис. 1.7).

Вектор напряжения на вторичной обмотке трансформатора, приведенного к первичному напряжению (\underline{U}'_2) откладывается под углом φ_2 к вектору тока \underline{I}'_2 . Величина напряжения на вторичной обмотке трансформатора, приведенного к первичному напряжению (U'_2) определяется с учетом коэффициента трансформации:

$$U'_2 = U_{2\Phi} \cdot n_\Phi = 384,8 \cdot 20 = 7664, \text{ В.}$$

Вектор ЭДС вторичной обмотки (\underline{E}'_2), приведенной к первичному напряжению, согласно уравнению (1.3), составленному по второму закону Кирхгофа (рис. 1.1), строится как сумма трех векторов:

$$\underline{E}'_2 = \underline{U}'_2 + R'_2 \underline{I}'_2 + jX'_2 \underline{I}'_2.$$

Тогда начиная от конца вектора напряжения \underline{U}'_2 строится вектор падения напряжения на активном сопротивлении вторичной обмотки, приведенной к первичному напряжению ($R'_2 \underline{I}'_2$), который сонаправлен с вектором тока \underline{I}'_2 , а далее вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении вторичной обмотки, приведенной к первичному напряжению ($jX'_2 \underline{I}'_2$), перпендикулярный вектору тока \underline{I}'_2 . Также начало координат и конец вектора $jX'_2 \underline{I}'_2$ соединяет вектор \underline{E}'_2 (см. рис. 1.7).

Длины векторов напряжений определяются по закону Ома:

$$R'_2 I'_2 = 6,7 \cdot 10,42 = 69,814, \text{ В};$$

$$X'_2 I'_2 = 13,7 \cdot 10,42 = 142,75, \text{ В}.$$

ЭДС первичной обмотки трансформатора равна ЭДС на вторичной обмотке, приведенной к первичному напряжению

$$\underline{E}_1 = \underline{E}'_2.$$

Вектор напряжения на первичной обмотке трансформатора (\underline{U}_1), согласно уравнению (1.2), составленному по второму закону Кирхгофа (см. рис. 1.1), строится как сумма трех векторов:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1.$$

Тогда начиная от конца вектора, обратного вектору ЭДС вторичной обмотки ($-\underline{E}_1$) строится вектор падения напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки ($R_1 \underline{I}_1$), сонаправленный с вектором тока \underline{I}_1 , а далее вектор падения напряжения на индуктивном сопротивлении первичной обмотки ($jX_1 \underline{I}_1$), перпендикулярный вектору тока \underline{I}_1 . Вектор напряжения на первичной обмотке трансформатора (\underline{U}_1) соединяет начало координат и конец вектора $jX_1 \underline{I}_1$ (см. рис. 1.7).

Длины векторов напряжений определяются по закону Ома:

$$R_1 I_1 = R_1 I_{1\phi} = 6,7 \cdot 10,46 = 70,08, \text{ В};$$

$$X_1 I_1 = X_1 I_{1\phi} = 13,7 \cdot 10,46 = 143,3, \text{ В}.$$

Индивидуальные задания

Для трехфазного трансформатора, паспортные данные которого приведены в табл. 1.4:

1) рассчитайте параметры и постройте Т-образную схему замещения одной фазы трансформатора;

2) определите КПД (η) и отклонение напряжения (Δu_2) при коэффициентах нагрузки $\beta = 0,4; 0,8; 1,0; 1,2$;

3) постройте графики $U_2 = f(I_2)$, $\eta = f(\beta)$; $\Delta U_2 = f(\beta)$ при коэффициентах нагрузки $\beta = 0, 0,4; 0,8; 1,0; 1,2$.

Характер нагрузки и коэффициент мощности приведены в табл. 1.5.

Способ соединения обмоток:

1) $Y/Y_H - 0$ для четных вариантов; $\Delta/Y_H - 11$ для нечетных вариантов.

Решите задачу самостоятельно, используя алгоритм решения, приведенный в задачах 1.1 и 1.2.

Номер варианта (табл. 1.4 и 1.5) выдается преподавателем каждому студенту индивидуально или определяется порядковым номером в журнале группы.

Таблица 1.4

Технические характеристики силовых трансформаторов

№ варианта	Тип трансформатора	Мощность, кВА	Верхний предел номинального напряжения обмотки, кВ		Потери, кВт		Ток хол. хода, %	Напряжение КЗ на номинальной ступени, %
			ВН	НН	ХХ	КЗ		
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ТМ - 25/6	25	6,3	0,23	0,170	0,6	5,15	4,5
2	ТМ - 40/6	40	6,3	0,4	0,240	0,880	4,5	4,5
3	ТМ - 63/6	63	6,3	0,4	0,360	1,28	4,5	4,5
4	ТМ -100/6	100	6,3	0,4	0,490	1,97	4,15	4,5
5	ТМ -160/6	160	6,3	0,23	0,73	2,65	3,85	4,5
6	ТМ -250/6	250	6,3	0,4	1,05	3,7	3,7	4,5
7	ТМ - 400/6	400	6,0	0,23	1,2	5,5	2,1	4,5
8	ТМВМ-25/6	25	6,3	0,23	0,105	0,6	0,6	4,5
9	ТМВМ-40/10	40	10,0	0,23	0,15	0,88	0,6	4,5
10	ТМВМ-63/6	63	6,3	0,23	0,22	1,28	0,55	4,5
11	ТМВМ-100/6	100	6,3	0,4	0,31	1,97	0,55	4,5
12	ТМВМ-160/6	160	6,3	0,4	0,46	2,65	0,5	4,5
13	ТМВМ-250/6	250	6,3	0,23	0,66	3,7	0,5	4,5
14	ТМ - 25/6	25	6,3	0,4	0,170	0,6	5,15	4,5
15	ТМ- 25/10	25	10,0	0,23	0,170	0,6	5,15	4,5
16	ТМ - 40/10	40	10,0	0,4	0,240	0,880	4,5	4,5

Окончание табл. 1.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9
7	ТМ - 63/10	63	10,0	0,4	0,360	1,28	2,8	4,5
18	ТМ-100/10	100	10,0	0,4	0,490	1,97	4,15	4,5
19	ТМ-160/10	160	10,0	0,23	0,73	2,65	3,85	4,5
20	ТМ-250/10	250	10,0	0,23	1,05	3,7	3,7	4,5
21	ТМ-400/10	400	10,0	0,23	1,2	5,5	2,1	4,5
22	ТМВМ-25/10	25	10,0	0,23	0,105	0,6	0,6	4,5
23	ТМ - 40/10	40	10,0	0,23	0,240	0,880	4,5	4,5
24	ТМВМ-100/10	100	10,0	0,4	0,31	1,97	0,55	4,5
25	ТМВМ-160/10	160	10,0	0,23	0,46	2,65	0,5	4,5

Таблица 1.5

Характер нагрузки и коэффициент мощности потребителя

Характер нагрузки	R	RL	RL	RL	RC	RC	RC
$\cos\varphi_2$	1	0,9	0,8	0,7	0,9	0,8	0,7
№ варианта	1; 8; 15; 22	2; 9; 16; 23	3; 10;17; 24;	4; 11;18; 25	5; 12; 19;	6; 13; 20;	7; 14; 21;

1.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 1.3.

Определить параметры Т-образной схемы замещения трехфазного трансформатора с номинальными величинами: мощность $S_H = 312$ кВА, первичное напряжение $U_{1H} = 35$ кВ, вторичное напряжение $U_{2H} = 0,4$ кВ. Мощность потерь холостого хода $P_0 = 1500$ Вт, ток холостого хода $i_0 = 7\%$, мощность потерь короткого замыкания $P_K = 4100$ Вт, напряжение короткого замыкания $u_K = 6,5\%$. Группа соединений обмоток Y/Y – 12.

Ответ: $X_0 = 56000$ Ом, $R_0 = 3858$ Ом, $X_1 = 125,06$ Ом, $R_1 = 25,83$ Ом, $X'_2 = 125,06$ Ом, $R'_2 = 25,83$ Ом.

Задача 1.4.

Определить номинальное и максимальное значения КПД трехфазного трансформатора, а также коэффициент нагрузки, при котором КПД имеет максимальное значение. Паспортные данные трансформатора: мощность $S_H = 50$ кВА, первичное напряжение

$U_{1H}=6$ кВ, вторичное напряжение $U_{2H} = 0,23$ кВ. Мощность потерь холостого хода $P_0 = 350$ Вт, ток холостого хода $i_0 = 7$ %, мощность потерь короткого замыкания $P_k = 1325$ Вт, напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5$ %, $\cos \varphi_2 = 0,8$. Группа соединений обмоток Y/Y – 12.

Ответ: $\eta_{ном} = 0,96$, $\eta_{max} = 0,967$, $\beta = 0,514$.

Задача 1.5.

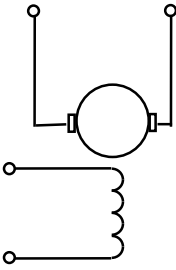
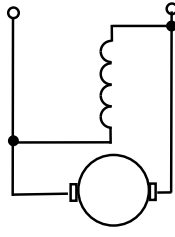
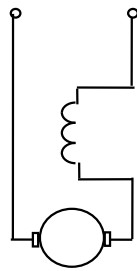
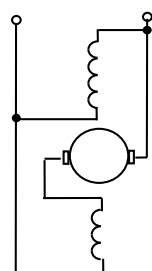
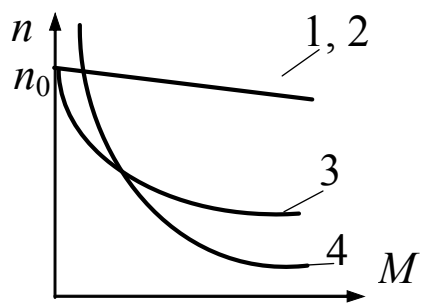
Определить напряжение U_2 однофазного трансформатора, если к трансформатору присоединен приемник энергии с параметрами $Z_H = 20$ Ом, $\cos \varphi_H = 0,9$. Паспортные данные трансформатора: мощность $S_H = 1$ кВА, первичное напряжение $U_{1H} = 660$ В, вторичное напряжение $U_{2H} = 48$ В. Мощность потерь холостого хода $P_0 = 25$ Вт, ток холостого хода $i_0 = 4,4$ %, мощность потерь короткого замыкания $P_k = 48$ Вт, напряжение короткого замыкания $u_k = 5,5$ %.

Ответ: $U_2 = 47,73$ В.

Практическое занятие № 2

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА

2.1. Краткие теоретические сведения

<i>Системы возбуждения машин постоянного тока</i>	
1. Независимое возбуждение	2. Параллельное возбуждение
	
3. Последовательное возбуждение	4. Смешанное возбуждение
	
<i>Механические характеристики двигателей постоянного тока</i>	
	<p>1 – независимого возбуждения, 2 – параллельного возбуждения, 3 – смешанного возбуждения, 4 – последовательного возбуждения</p>
<p>Электромагнитная мощность, ЭДС обмотки якоря и развиваемый вращающий момент машины постоянного тока</p> $P_{\text{эм}} = EI_{\text{я}}, \quad E = \frac{pN}{60a} \Phi n = C_E \Phi n \quad M = \frac{pN}{2\pi a} \Phi I_{\text{я}} = C_M \Phi I_{\text{я}},$ <p>Уравнение электрического состояния цепи якоря в режиме генератора: $U = E - I_{\text{я}} R_{\text{я}},$ мощность отдаваемая нагрузке $P_2 = UI.$</p>	

Уравнение электрического состояния цепи якоря в режиме двигателя:

$$U = E + I_{\text{я}} R_{\text{я}}, \text{ потребляемая мощность } P_1 = UI.$$

Частота вращения холостого хода и момент на валу двигателя

$$n_{\text{х}} = n_{\text{н}} \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{н}} - I_{\text{ян}} R_{\text{я}}}, \quad M = 9,55 \frac{P_2}{n}.$$

КПД машины постоянного тока $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \sum p}$; $\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1}$;

$$\sum p = p_{\text{э}} + p_{\text{эв}} + p_{\text{мх}} + p_{\text{эщ}} + p_{\text{магн}} + p_{\text{д}} = p_{\text{э}} + p_{\text{эв}} + p_{\text{х}},$$

где $p_{\text{х}} = p_{\text{мх}} + p_{\text{магн}} + p_{\text{д}}$ — потери холостого хода.

Токи двигателя:

– для двигателя параллельного возбуждения $I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}};$

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{U - C_E \Phi n}{R_{\text{я}}}; \quad I_{\text{в}} = \frac{U}{R_{\text{во}}} = \frac{U}{R_{\text{в}} + R_{\text{р}}}.$$

– для двигателя последовательного возбуждения $I = I_{\text{я}} = I_{\text{в}}.$

$$n = \frac{E_{\text{я}}}{C_E \Phi} = \frac{U - IR_{\text{я}}}{C_E \Phi}; \quad R_{\text{р}} = \frac{U}{I_{\text{яном}}} - R_{\text{я}};$$

Уравнение механической характеристики двигателя постоянного тока параллельного возбуждения:

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{MR_{\text{я}}}{C_E C_M \Phi^2}; \quad C_M = 9,55 C_E.$$

Кратность пускового тока: $K_I = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}};$

кратность пускового момента: $K_M = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{н}}}.$

Достижение максимального КПД при равенстве постоянных и переменных потерь или $\sum RI_{\text{ном}}^2 = P_{\text{х}} + U_{\text{в}} I_{\text{в}}$

Потребляемый ток при максимальном КПД $I = \sqrt{\frac{P_{\text{х}} + I_{\text{в}} U_{\text{в}}}{R_{\text{я}}}}$

Максимальный КПД $\eta_{\text{max}} = 1 - 2I_{\text{в}}^2 R_{\text{я}} / U (I + I_{\text{в}})$

2.2. Типовые задачи

Задача 2.1.

Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие данные: $U_H = 110$ В, $I_H = 50,5$ А, $n_H = 1000$ об/мин, $R_{\text{я}} = 0,21$ Ом, $R_{\text{в}} = 62$ Ом, КПД $\eta = 81$ %. Определить все виды потерь в номинальном режиме, ток при максимальном КПД.

Решение

Мощность, потребляемая двигателем при номинальной нагрузке,

$$P_1 = U_H \cdot I_H = 110 \cdot 50,5 = 5555 \text{ Вт.}$$

Номинальная мощность на валу двигателя

$$P_{2H} = \eta P_1 = 0,81 \cdot 5555 \approx 4500 \text{ Вт.}$$

Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\sum \Delta P = P_1 - P_{2H} = 5555 - 4500 = 1055 \text{ Вт.}$$

Ток обмотки возбуждения

$$I_{\text{в}} = \frac{U_H}{R_{\text{в}}} = \frac{110}{62} = 1,77 \text{ А}$$

Ток в обмотке якоря

$$I_{\text{я}} = I_H - I_{\text{в}} = 50,5 - 1,77 = 48,73 \text{ А.}$$

Электрические потери в цепи якоря и обмотке возбуждения

$$\Delta P_{\text{э}} = \Delta P_{\text{эя}} + \Delta P_{\text{эв}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} = 48,73^2 \cdot 0,21 + 1,77^2 \cdot 62 = 693 \text{ Вт.}$$

Добавочные потери составляют 1% от номинальной мощности:

$$\Delta P_{\text{д}} = 0,01 P_H = 0,01 \cdot 4500 = 45 \text{ Вт.}$$

Механические и магнитные потери

$$\Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{мг}} = \sum \Delta P - (\Delta P_{\text{э}} + \Delta P_{\text{д}}) = 1055 - (693 + 45) = 317 \text{ Вт.}$$

Потери холостого хода

$$\Delta P_{\text{х}} = \Delta P_{\text{мх}} + \Delta P_{\text{мг}} + \Delta P_{\text{д}} = 317 + 45 = 362 \text{ Вт.}$$

Условием достижения максимального значения КПД является равенство постоянных и переменных потерь. Постоянными потерями являются потери холостого хода и потери в цепи возбуждения. Переменными – потери в обмотке якоря, так как они зависят от тока якоря, а, следовательно, от нагрузочного момента.

$$I_1^2 R_{\text{я}} = \Delta P_{\text{х}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}},$$

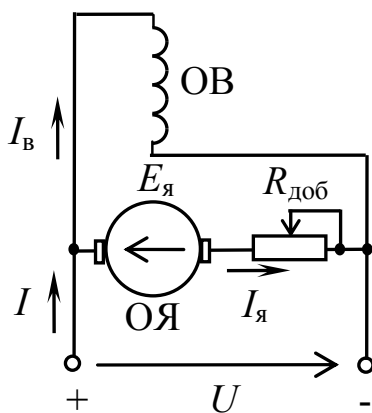
отсюда ток в цепи нагрузки при максимальном КПД

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_{\text{х}} + I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}}{R_{\text{я}}}} = \sqrt{\frac{362 + 1,77^2 \cdot 62}{0,21}} = 51,5 \text{ А}$$

Максимальный КПД η_{max}

$$\eta_{\text{max}} = 1 - 2I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}} / U (I + I_{\text{в}}) = 1 - (2(51,5)^2 0,21) / (110(51,5 + 1,77)) = 0,811.$$

Задача 2.2.



Электродвигатель постоянного тока с параллельным возбуждением характеризуется следующими номинальными величинами:

$$U_{\text{н}} = 220 \text{ В}, P_{\text{н}} = 4 \text{ кВт}, n_{\text{н}} = 1500 \text{ об/мин}, \\ \eta = 82\%, R_{\text{я}} = 0,72 \text{ Ом}, R_{\text{ОВ}} = 320 \text{ Ом}.$$

Требуется:

- определить частоту вращения якоря при холостом ходе;
- определить частоту вращения якоря при номинальном моменте на валу двигателя и включении в цепь якоря добавочного сопротивления, равного $3R_{\text{я}}$.
- построить естественную и искусственную механические характеристики электродвигателя.
- определить сопротивление пускового реостата $R_{\text{п}}$, при котором пусковой ток $I_{\text{п}}$ не превышает $2I_{\text{н}}$.

Указания: Реакцией якоря и током холостого хода якоря пренебречь.

Решение.

Мощность, потребляемая из сети

$$P_1 = \frac{P_H}{\eta} = \frac{4000}{0,82} = 4878 \text{ Вт.}$$

Ток, потребляемый из сети двигателя в номинальном режиме

$$I_H = \frac{P_1}{U_H} = \frac{4878}{220} = 22,2 \text{ А.}$$

Ток в цепи возбуждения при номинальном режиме

$$I_{BH} = \frac{U_H}{R_B} = 0,68 \text{ А.}$$

Ток в цепи якоря при номинальном режиме

$$I_{яH} = I_H - I_{BH} = 22,2 - 0,68 = 21,52 \text{ А.}$$

Номинальный момент

$$M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H} = 9,55 \frac{4000}{1500} = 25,5 \text{ Н м,}$$

здесь P_H подставляется в Вт, n - в об/мин.

а) Частота вращения при холостом ходе определяется из уравнения механической характеристики (2.1) при $M=0$.

$$n = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{(R_{я} + R_{д})}{C_M C_E \Phi^2} M, \quad (2.1)$$

$$n_x = \frac{U}{C_E \Phi}. \quad (2.2)$$

В соответствии с законом электромагнитной индукции для номинального режима

$$E_H = C_E n_H \Phi,$$

откуда

$$n_H = \frac{E_H}{C_E \Phi} = \frac{U_H - R_{я} I_{яH}}{C_E \Phi}.$$

Разделив n_x на n_H , получим частоту вращения холостого хода

$$n_x = n_H \frac{U_H}{U_H - R_{я} I_{яH}} = 1500 \frac{220}{220 - 0,72 \cdot 21,52} = 1613,7 \text{ об/мин.}$$

б) Для определения частоты вращения при введении добавочного сопротивления в цепь обмотки якоря необходимо определить величины $(C_E \Phi)$, что можно сделать из уравнения (2.2)

$$C_E \Phi = \frac{U}{n_x} = \frac{220}{1613,7} = 0,136.$$

Учитывая, что $C_M \approx 9,57 C_E$, а уравнение механической характеристики (2.1) частота вращения при введении $R_d = 3R_{я}$ и номинальном моменте

$$n' = \frac{U}{C_E \Phi} - \frac{R_{я} + 3R_{я}}{9,57(C_E \Phi)^2} M_H = \frac{220}{0,136} - \frac{0,72 + 3 \cdot 0,72}{9,57(0,136)^2} 25,5 = 1202,7 \text{ об/мин.}$$

в) Механическая характеристика двигателя $n(M)$ – прямая линия, ее можно построить по двум точкам: точке холостого хода, с координатами $n_x, M=0$ и точке номинального режима с координатами n_H, M_H – для естественной характеристики; точке холостого хода и точке с координатами n', M_H – для искусственной характеристики

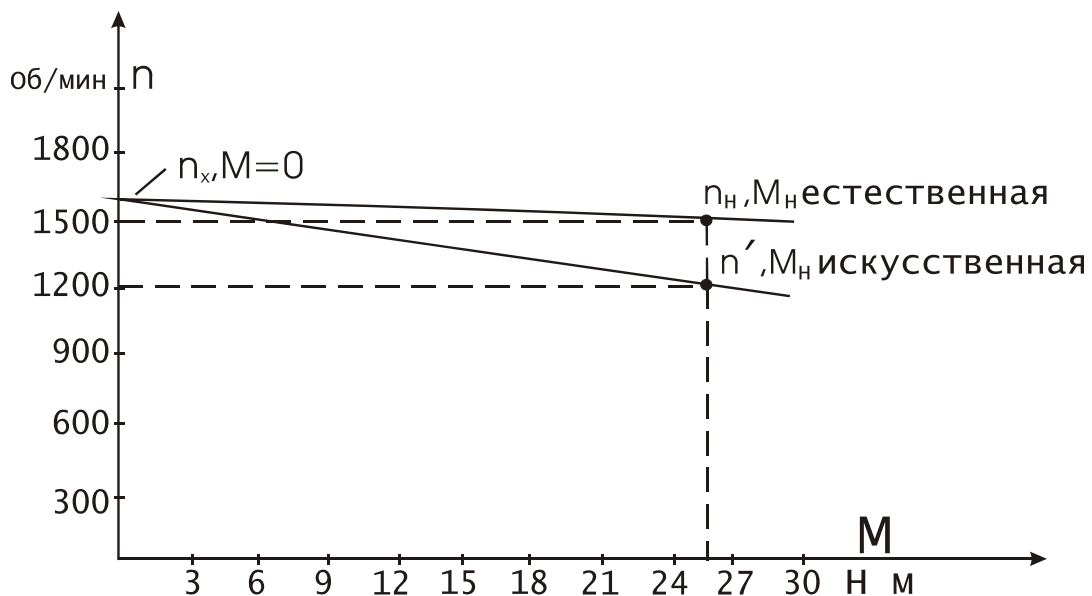


Рис. 2.1

з) В момент пуска двигателя ротор неподвижен, $n=0$ и $E=C_E n \Phi=0$.

Ток в цепи якоря $I_{яп} = U_H / (R_я + R_п)$, откуда $R_п = U_H / I_{яп} - R_я$

Максимально допустимый ток двигателя при пуске $I_п = 2I_H$.
Ток в цепи якоря $I_{яп}$ в таком режиме

$$I_{яп} = 2 I_H - I_{вн} = 44,4 - 0,68 = 43,72 \text{ А.}$$

Сопротивление пускового реостата $R_п$, при котором пусковой ток $I_п$ не превышает $2 I_H$ составит

$$R_п = U_H / I_{яп} - R_я = 220 / 43,72 - 0,72 = 4,31 \text{ Ом.}$$

Задача 2.3.

Двигатель последовательного возбуждения имеет следующие номинальные данные: $U_H = 220 \text{ В}$, $I_H = 125 \text{ А}$, $n_H = 1000 \text{ об/мин}$, $\eta_H = 0,82$, $R_я = 1 \text{ Ом}$. Рассчитать и построить механическую характеристику двигателя $n = f(M)$.

Решение.

Найдем момент при токах $I = (0.2; 0.4; 0.6; 0.8; 1)I_H$

Вращающий момент двигателя $M = C_M I_{яп} \Phi$,

при номинальном токе $I_{яп} = I_H$ $M_H = C_M I_{яп} \Phi_H$.

Выразим M через M_H :

$$M = M_H \frac{I}{I_H} \cdot \frac{\Phi}{\Phi_H},$$

где $M_H = 9,55 \frac{P_H}{n_H} = 9,55 \frac{U_H I_H \eta_H}{n_H} = 9,55 \frac{220 \cdot 125 \cdot 0,82}{1000} = 195,8, \text{ Н} \cdot \text{м.}$

Так как в двигателе последовательного возбуждения $I = I_я = I_в$, то по заданным значениям I/I_H находим Φ/Φ_H и M .

При расчете величины магнитного потока последовательной обмотки в зависимости от $I_я$ необходимо воспользоваться кривой $\Phi/\Phi_H = f(I/I_я)$ (рис. 2.2).

Частота вращения определяется из (3.1). При номинальном режиме $n_H = (U_H - R_я I_{яп}) / C_E \Phi$ (3.4). Разделив (3.1) на (3.4) получим:

$$n = n_H \frac{U_H - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{U_H - R_{\text{я}} I_{\text{яH}}} \cdot \frac{\Phi_H}{\Phi}$$

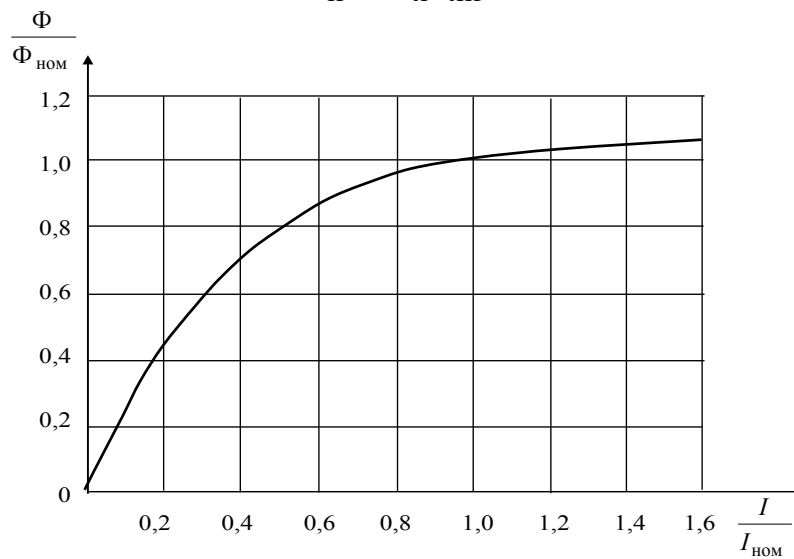


Рис. 2.2

Данные расчета сведем в табл. 2.1

Таблица 2.1

I/I_H	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
I, A	25	50	75	100	125	150
Φ/Φ_H	0,45	0,73	0,88	0,95	1,0	1,03
$M, Нм$	17,6	57,2	103,4	148,8	195,8	242
$n, об/мин$	4554	2450	1740	1326	1000	714,7

По расчетным данным строим механическую характеристику

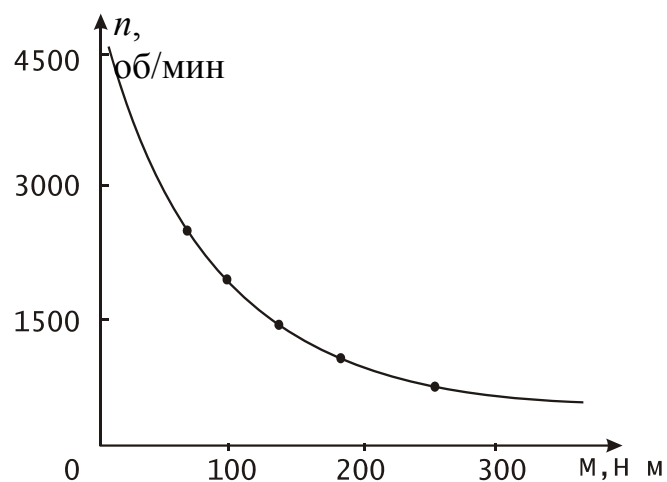


Рис. 2.3

Как видно из рисунка, характеристика при увеличении нагрузочного момента до M_H является «мягкой», то есть, обороты значительно снижаются, а затем, при малых значениях n , становится «жесткой» – обороты снижаются медленно при увеличении нагрузочного момента, то есть двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением обладает хорошими тяговыми свойствами.

Задача 2.4.

Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные.

Тип	P_H , кВт	U_H , В	n_H , об/мин	η , %	Сопротивление при 20 °С	
					$R_{я}$, Ом	$R_{в}$, Ом
2ПН112МУХЛ4	2,5	230	3000	75,0	0,788	156

Определите потребляемую (механическую) мощность, номинальный момент турбины вращающей ротор генератора, номинальный ток обмотки якоря, ЭДС обмотки якоря в номинальном режиме, сумму потерь, потери электрические, магнитные и механические потери в номинальном режиме работы.

Решение

$P_H = P_{2H}$ – номинальная электрическая мощность, отдаваемая потребителям.

Номинальная механическая мощность, потребляемая генератором

$$P_1 = P_H / \eta = 2500 / 0,75 = 3333,3 \text{ Вт.}$$

Номинальный вращающий момент турбины вращающей ротор генератора

$$M = 9,55 P_{1H} / n_H = 9,55 \cdot 3333,3 / 3000 = 10,61 \text{ Нм.}$$

Сумма потерь при номинальной нагрузке

$$\Sigma \Delta P = P_1 - P_{2H} = 3333,3 - 2500 = 833,3 \text{ Вт.}$$

Номинальный ток нагрузки

$$I_H = P_H / U_H = 2500 / 230 = 10,87 \text{ А.}$$

Номинальный ток обмотки возбуждения

$$I_B = U_H / R_B = 230 / 156 = 1,47 \text{ А.}$$

Номинальный ток в обмотке якоря

$$I_{яH} = I_H + I_B = 10,87 + 1,47 = 12,34 \text{ А.}$$

Уравнение электрического состояния цепи якоря в режиме генератора:

$$U = E - I_{я} R_{я},$$

тогда $E_H = U_H + I_{яH} R_{я} = 230 + 12,34 \cdot 0,788 = 239,72 \text{ В.}$

Электрические потери в цепи якоря и обмотке возбуждения
 $\Delta P_{\Sigma} = \Delta P_{\Sigma я} + \Delta P_{\Sigma в} = I_{яH}^2 R_{я} + I_B^2 R_B = 12,34^2 \cdot 0,788 + 1,47^2 \cdot 156 = 457,1 \text{ Вт.}$

Добавочные потери составляют 1 % от номинальной мощности:

$$\Delta P_{д} = 0,01 P_H = 0,01 \cdot 2500 = 25 \text{ Вт.}$$

Механические и магнитные потери

$$\Delta P_{мх} + \Delta P_{мг} = \Sigma \Delta P - (\Delta P_{\Sigma} + \Delta P_{д}) = 833,3 - (457,1 + 25) = 351,2 \text{ Вт.}$$

Индивидуальные задания

1. Каждому индивидуально решить задачи 2.1, 2.2 и 2.4 с паспортными данными двигателей, которые приведены в табл. 2.2 – номер варианта выдается преподавателем или определяется порядковым номером в журнале группы.

Таблица 2.2

Технические данные двигателей постоянного тока параллельного возбуждения

№ варианта	Тип машины постоянного тока	P_H кВт	U_H В	n_H об/мин	η_H %	$R_{я}$ Ом	R_B Ом
1	2	3	4	5	6	7	8
1	2ПН90МУХЛ4	0,17	110	750	47,5	5,84	162
2	2ПН90МУХЛ4	0,37	220	1500	61,5	10,61	610
3	2ПН90ЛУХЛ4	0,55	110	1500	67,5	1,3	112
4	2ПН90ЛУХЛ4	1,3	220	3150	78,0	1,3	340
5	2ПБ90МУХЛ4	0,28	110	1600	63,5	2,69	222
6	2ПБ90МУХЛ4	0,55	220	3000	71,0	3,99	810

Окончание табл. 2.2

<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>	<i>7</i>	<i>8</i>
7	2ПБ90ЛУХЛ4	0,37	110	1500	66,0	2,1	192
8	2ПБ90ЛУХЛ4	0,75	220	3150	77,0	2,28	720
9	2ПН100МУХЛ4	0,5	110	1000	65	1,79	120
10	2ПН100МУХЛ4	2,0	220	3000	79,0	0,805	265
11	2ПН100ЛУХЛ4	1,1	110	1500	72,5	0,52	81
12	2ПН100ЛУХЛ4	2,2	220	3150	81,0	0,52	295
13	2ПБ100МУХЛ4	0,6	110	1500	72,0	1,083	153
14	2ПБ100МУХЛ4	1,2	220	3150	80,0	1,325	595
15	2ПН112МУХЛ4	1,5	110	1500	70,0	0,42	44
16	2ПН112МУХЛ4	3,6	220	3000	79,0	0,42	129
17	2ПН112ЛУХЛ4	2,2	110	4000	74,5	0,242	44
18	2ПН112ЛУХЛ4	5,3	220	3000	80,0	0,242	96,3
19	2ПБ112МУХЛ4	0,75	110	1500	70,0	0,565	84,3
20	2ПБ112МУХЛ4	1,4	220	3000	78,5	0,788	403
21	2ПБ112ЛУХЛ4	1,0	110	1600	74,0	0,378	80
22	2ПБ112ЛУХЛ4	2,0	220	3150	81,0	0,413	303
23	2ПН132МУХЛ4	4,0	440	1500	79,0	2,28	134
24	2ПН132МУХЛ4	7,0	110	2200	81,0	0,067	25,6
25	2ПН132ЛУХЛ4	3,0	220	1000	75,5	0,88	138
26	2ПН132ЛУХЛ4	5,5	440	1600	81,0	1,28	101
27	2ПБ132МУХЛ4	1,6	110	1060	71,0	0,346	54,5
28	2ПБ132МУХЛ4	3,7	220	2360	81,0	0,346	202
29	2ПБ132ЛУХЛ4	1,9	440	1120	78,0	4,05	216
30	2ПБ132ЛУХЛ4	4,5	110	2360	84,0	0,055	43

Методические рекомендации

Для расшифровки обозначения двигателей постоянного тока следует учесть, что структура условного обозначения машин постоянного тока серии 2П имеет вид:

$$\begin{array}{cccccc} \underline{2П} & \underline{X} & \underline{X} & \underline{X} & \underline{X} & \underline{X} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 \end{array},$$

где 1 – название серии: вторая серия машин постоянного тока;

2 – исполнение по способу защиты и вентиляции: Н – защищенное с самовентиляцией, Ф – защищенное с независимой вентиляцией от постоянного вентилятора, Б – закрытое с естественным охлаждением, О – закрытое с внешним обдувом от постоянного вентилятора;

3 – высота оси вращения, мм;

4 – условное обозначение длины сердечника якоря: М – средняя, L – большая;

5 – буква Г при наличии встроенного тахогенератора (в обозначении двигателей постоянного тока без тахогенератора опускается);

6 – климатическое исполнение и категория размещения.

Например, обозначение двигателя 2ПФ314МУХЛ4 имеет следующую расшифровку:

2П – номер серии;

Ф – защищенное исполнение с независимой вентиляцией от постоянного вентилятора;

314 – высота оси вращения, мм;

М – длина сердечника якоря средняя;

УХЛ – климатическое исполнение для умеренного и холодного климата;

4 – категория размещения – для эксплуатации в помещениях с искусственно регулируемым климатическими условиями (например, в закрытых отапливаемых производственных помещениях).

2. Решить самостоятельно задачу 2.3.

Задачу решить с числовыми значениями, которые представлены в таблице (8 вариантов). Один вариант решают несколько студентов (2–4 человека). Номер варианта назначает преподаватель.

Результаты должны быть оформлены индивидуально.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
U_H , В	220	220	110	440	220	110	220	440
I_H , А	500	600	25	400	100	50	200	500
n_H , об/мин	1000	1500	1500	1000	3000	2000	1500	1000
$R_{я}$, Ом	0,02	0,28	0,3	0,05	0,38	0,25	0,15	0,025
η_H , %	85,5	88,3	87,2	84,8	86,8	87,5	86,2	88,1

2.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 2.5.

Определите частоту вращения двигателя независимого возбуждения, если напряжение, подаваемое на якорь, уменьшится до 200 В.

Паспортные данные двигателя:

$P_H = 6$ кВт, $U_H = 220$ В, $\eta_H = 80$ %, $R_B = 132$ Ом, $R_{я} = 0,44$ Ом,
 $n_H = 1500$ об/мин.

Ответ: 1353 об/мин

Задача 2.6.

Двигатель параллельного возбуждения включен в сеть с напряжением $U = 220$ В. Ток двигателя $I = 12,2$ А, сопротивления цепи якоря и возбуждения соответственно составляют – $R_{я} = 1$ Ом, $R_B = 120$ Ом.

Определите ток в цепи возбуждения, ток в цепи якоря, потери в цепи возбуждения и якоря, ЭДС, наводимую в обмотке якоря.

Ответ: $I_B = 1,83$ А, $I_{я} = 10,37$ А, $E = 209,63$ В.

Задача 2.7.

Вычислите величину пускового тока авиационного электродвигателя постоянного тока последовательного возбуждения с номинальными параметрами:

$$P_{\text{н}} = 550 \text{ Вт}, I_{\text{н}} = 35 \text{ А}, \eta_{\text{н}} = 65 \%, n_{\text{н}} = 5000 \text{ об/мин}, R_{\text{я}} + R_{\text{в}} = 0,256 \text{ Ом}.$$

Ответ: 94,4 А.

Задача 2.8.

Генератор постоянного тока параллельного возбуждения имеет следующие паспортные данные.

$$P_{\text{н}} = 1,25 \text{ кВт}, U_{\text{н}} = 230 \text{ В}, \eta_{\text{н}} = 76 \%, n_{\text{н}} = 3000 \text{ об/мин}, R_{\text{я}} = 1,792 \text{ Ом}, R_{\text{в}} = 359 \text{ Ом}.$$

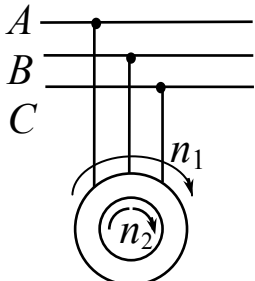
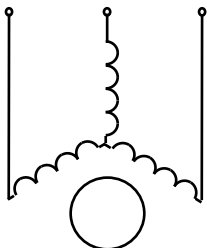
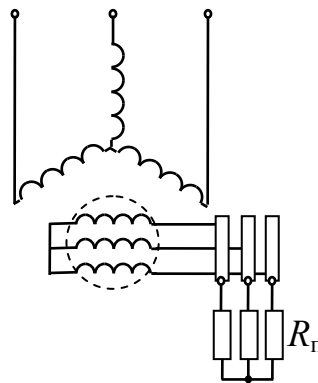
Определите: номинальный ток генератора, ток обмотки возбуждения, а также ток и ЭДС обмотки якоря.

$$\text{Ответ: } I_{\text{н}} = 5,43 \text{ А}, I_{\text{в}} = 0,64 \text{ А}, I_{\text{я}} = 6,07 \text{ А}, E = 240,87 \text{ В}.$$

Практическое занятие № 3

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ

3.1. Краткие теоретические сведения

<i>Асинхронный двигатель</i>																
 <p>n_1 – частота вращения магнитного поля; n_2 – частота вращения ротора</p>	<p>с короткозамкнутым ротором</p> 	<p>с фазным ротором</p> 														
<p><i>Скольжение, частота вращения:</i></p> $s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \quad s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%;$ <p>Частота вращения магнитного поля статора n_1 и частота вращения ротора n_2</p> $n_1 = \frac{60 f_1}{p}; \quad n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60 f_1}{p} (1 - s),$ <p>здесь $p = 1, 2, 3, 4, 5, 6$ – число пар полюсов машины.</p> <p>Стандартная шкала скоростей магнитного поля статора n_1 (синхронная скорость) для промышленных двигателей $f_1 = 50$ Гц</p> <table border="1" style="margin: 10px auto; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr> <td>p</td> <td>1</td> <td>2</td> <td>3</td> <td>4</td> <td>5</td> <td>6</td> </tr> <tr> <td>n_1</td> <td>3000</td> <td>1500</td> <td>1000</td> <td>750</td> <td>600</td> <td>500</td> </tr> </table> <p>Критическое скольжение, при котором двигатель развивает максимальный момент</p> $s_{кр} = s_{ном} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1})$ <p>Частота тока и ЭДС, наводимая магнитным полем статора в проводниках статора E_1 и ротора E_{2s}:</p>			p	1	2	3	4	5	6	n_1	3000	1500	1000	750	600	500
p	1	2	3	4	5	6										
n_1	3000	1500	1000	750	600	500										

$$f_2 = sf_1 = s \frac{pn_1}{60};$$

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_m k_{01};$$

$$E_{2s} = 4,44 f_2 w_2 \Phi_m k_{02}; \quad E_{2s} = sE_2.$$

Здесь E_2 – ЭДС, наводимая в роторе при его неподвижном состоянии.

Мощности и КПД:

Потребляемая электрическая мощность

$$\text{Активная } P_1 = 3I_{1\phi} U_{1\phi} \cos \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi;$$

$$\text{Реактивная } Q = 3I_{1\phi} U_{1\phi} \sin \varphi = \sqrt{3} U_1 I_1 \sin \varphi;$$

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}, \quad \eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + \sum p)};$$

Электромагнитная мощность

$$P_{эм} = P_1 - \Delta p_1 = \sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi - (p_{1э} + p_{1м}) = \Omega_1 M = \frac{P_{2э}}{s},$$

Мощность на валу (механическая)

$$P_2 = P_1 - \sum p = P_1 - (p_{1э} + p_{1м} + p_{2э} + p_{2м} + p_{мх} + p_{д}),$$

$$P_2 = \eta P_1, \quad P_2 = P_{эм} (1 - s),$$

$$P_2 = \Omega_2 M = \frac{2\pi n_2}{60} M = \frac{\pi n_2}{30} M.$$

Вращающий момент

$$M = 9,55 \frac{P_2}{n_2}, \quad M = \frac{P_{эм}}{\Omega_1} = \frac{9,55 P_1}{n_1}, \quad M = \frac{3E_2 I_2 \cos \varphi_2}{\Omega_1},$$

$$M = C_M I_{2s} \Phi_m \cos \varphi_2, \quad M = CU^2,$$

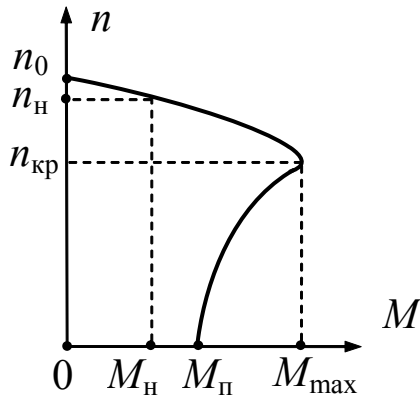
Зависимость момента от скольжения:

$$M = \frac{3pU_1^2 \frac{R'_2}{s}}{\omega_0 \left[\left(R_1 + \frac{R'_2}{s} \right)^2 + (X_1 + X'_2)^2 \right]} \quad M = \frac{2M_{\max}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

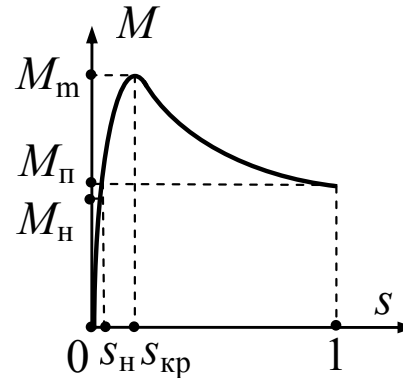
Кратность пускового тока, пускового и максимального момента:

$$\alpha = \frac{I_{\text{п}}}{I_{\text{ном}}}, \quad \beta = \frac{M_{\text{п}}}{M_{\text{ном}}}, \quad \lambda = \frac{M_{\text{max}}}{M_{\text{ном}}}.$$

Механическая характеристика



Характеристика «Момент-скольжение»



3.2. Типовые задачи

Задача 3.1.

Номинальная частота вращения ротора асинхронного двигателя $n_H = 1434$ об/мин. Определите число пар полюсов двигателя, номинальное скольжение, частоту тока и ЭДС в обмотке вращающегося ротора, если частота напряжения сети $f_1 = 50$ Гц.

Решение

Величину частоты вращения магнитного поля можно получить, отталкиваясь от номинальной частоты вращения ротора $n_H = 1434$ об/мин и используя стандартную шкалу скоростей для двигателей промышленного использования, при этом частота вращения поля будет иметь ближайшее большее значение – $n_1 = 1500$ об/мин.

$$n_1 = 60f_1/p = 1500 \text{ об/мин.}$$

Значит число пар полюсов статорной обмотки

$$p = 60f_1/n_1 = 60 \cdot 50/1500 = 2.$$

Можно определить $p = 60f_1/n_H = 60 \cdot 50/1434 = 2,09$, но число пар полюсов может быть только целым, оно принимается равным 2.

Номинальное значение скольжения

$$s_H = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1500 - 1434}{1500} = 0,044 \text{ или } 4,4 \%$$

Частота тока и ЭДС в обмотке ротора при номинальной нагрузке

$$f_{2H} = s_H f_1 = 0,044 \cdot 50 = 2,2 \text{ Гц,}$$

то есть, цепь обмотки ротора является низкочастотной.

Задача 3.2.

На рис. 3.1 изображен паспортный щиток трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором серии 5А (рис. 3.1). Определите мощность, потребляемую двигателем из сети, а также номинальный вращающий момент на валу.

Двигатель асинхронный									
Тип	5АА80М4	№	6630152						
3ф -	50	Гц	Δ	380	V	3,4	A		
	1,1	kW	1410	об/мин	КПД	73	%	cos φ	0,79
Режим	S1	Кл. изол.	F	13,0	кг				

Рис. 3.1

Решение

На щитке, который прикреплен к корпусу двигателя, представлены основные паспортные данные.

Для определения основных электрических и механических номинальных величин можно воспользоваться маркировкой двигателя.

Обозначение двигателя включает в себя следующую структуру:

$$\begin{array}{cccccccccc} \underline{Y} & \underline{A} & \underline{X} & \underline{X} & \underline{XXX} & \underline{X} & \underline{X} & \underline{X} & \underline{X} & \underline{X} \\ 1 & 2 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 & 8 & 9 & 10 \end{array}$$

1 – порядковый номер серии;

2 – род двигателя – асинхронный;

3 – исполнение по степени защиты (Н – IP23, отсутствие данного знака – IP44);

4 – исполнение двигателя по материалу станины и щита (А – станина и щиты алюминиевые; Х – станина алюминиевая, щиты чугунные или наоборот; отсутствие данного знака означает, что станина и щиты чугунные или стальные);

5 – высота оси вращения;

6 – условная длина станины по МЭК (S,M,L);

7 – длина сердечника статора (А или В, отсутствие данного знака означает одну длину в установочном размере);

8 – климатические исполнения по ГОСТ 15150-69 (У – для умеренного климата);

9 – число полюсов: 2,4,6,8,10,12;

10 – категория размещения по ГОСТ 15150-69(3) (1 – на открытом воздухе; 2 – в помещениях, в которых отсутствует прямое воздействие атмосферных осадков и солнечной радиации; 3 – закрытые помещения с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий).

Представленный асинхронный двигатель 5АА80М4:

5А – асинхронный двигатель 5 серии;

А – станина и щиты алюминиевые;

80 – высота оси вращения, мм;

М – средняя длина корпуса по установочным размерам;

4 – число полюсов ($n_1 = 1500$ об/мин), то есть $p = 2$.

Схема соединения статорных обмоток – треугольник (Δ). Номинальное напряжение ($U_H = 380$ В) – линейное напряжение сети, в которую включается двигатель.

Номинальная мощность $P_H = 1,1$ кВт – это механическая мощность на валу двигателя, то есть мощность P_{2H} .

Номинальная мощность, потребляемая из сети, с учетом КПД

$$P_{1H} = \frac{P_{2H}}{\eta} = \frac{1100}{0,73} = 1506,8 \text{ Вт.}$$

Номинальные обороты двигателя $n_{2H} = 1410$ об/мин.

Номинальный вращающий момент двигателя:

$$M = 9,55 \frac{P_{2H}}{n_{2H}} = 9,55 \cdot \frac{1100}{1410} = 7,45 \text{ Нм.}$$

Задача 3.3.

Асинхронный трехфазный двигатель с короткозамкнутым ротором типа 4А100S4 имеет следующие паспортные данные: напряжение $U_n = 220/380$, В, номинальная мощность $P_n = 3$, кВт; частота вращения $n_n = 1434$, об/мин; КПД $\eta = 82,0\%$; коэффициент мощности $\cos\varphi = 0,83$; кратность пускового тока $\alpha = 6,0$, кратность пускового момента $\beta = 1,2$.

Двигатель включен в сеть 220 В.

Определите: схему включения двигателя, номинальный и пусковой токи. Рассчитать сечение токоподводящих проводов, приняв экономическую плотность тока 3 А/мм^2 .

Определите, возможен ли пуск нагруженного двигателя, если подводимое напряжение на 10% ниже номинального.

Решение

Для определения фазных, линейных и пусковых токов (фазными токами являются токи в обмотках статора, линейными – токи в подводящих проводах) нужно учесть, что, если двигатель рассчитан на работу от сети переменного тока с напряжением 220/380, В, то это значит, что каждая фаза обмотки статора рассчитана на напряжение 220 В.

Обмотку необходимо включить по схеме «треугольник» (рис. 3.2,а), если в сети линейное напряжение $U_n = 220$ В, и по схеме «звезда», если в сети линейное напряжение $U_n = 380$ В (рис. 3.2,б).

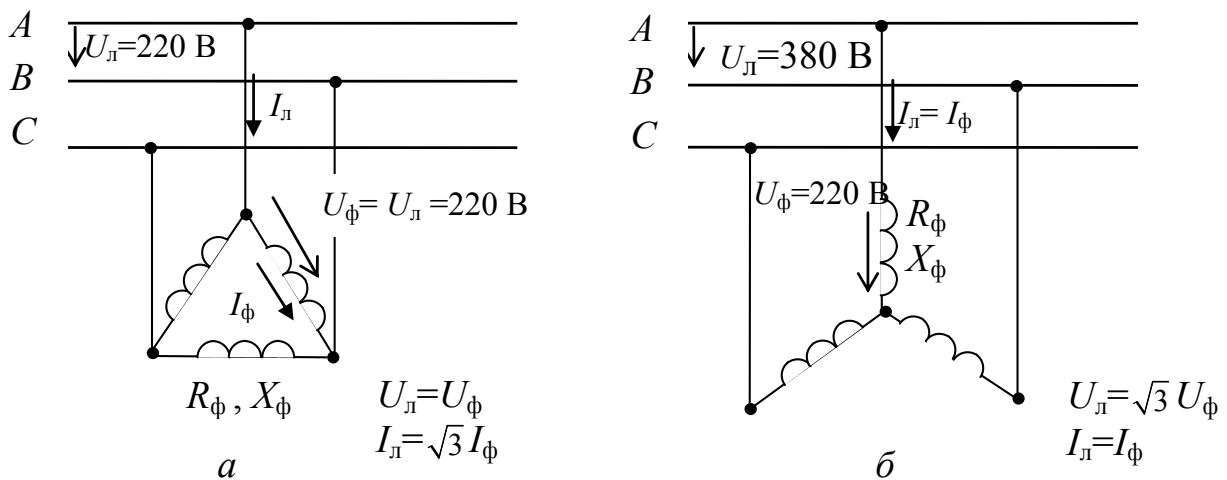


Рис. 3.2

В нашем случае, двигатель включен в сеть 220 В, значит его схема соединения – «треугольник», что изображено на рис. 3.1,а.

Мощность, потребляемая двигателем из сети:

$$P_{1н} = \frac{P_{2н}}{\eta} = \frac{3000}{0,82} = 3750, \text{ Вт}.$$

Определим фазный, линейный и пусковой токи, при этом $U_{\phi} = U_{л}$.

Фазный ток в обмотке статора

$$I_{\phi} = \frac{P_1}{3U_{\phi} \cos \varphi} = \frac{3750}{3 \cdot 220 \cdot 0,83} = 6,85, \text{ А}.$$

Линейный ток – ток в проводах, питающих двигатель. Учитывая, что двигатель является симметричной трехфазной нагрузкой, выполняется следующее соотношение

$$I_{л} = \sqrt{3} \cdot I_{\phi} = \sqrt{3} \cdot 6,85 = 11,92, \text{ А}.$$

Пусковой ток

$$I_{п} = \alpha \cdot I_{л} = 6 \cdot 11,92 = 71,52, \text{ А}.$$

Сечение токоподводящих проводов (линейных проводов) определяют через экономическую плотность тока, которая ограничивается допустимой температурой нагрева провода и зависит от его марки (материал провода, изоляция и др.). Экономическая плотность тока для конкретных марок указывается в справочных материалах.

Сечение вычисляется из величины линейного тока, так как он протекает длительное время и, именно он, нагревает провода. Пусковой ток, несмотря на значительную величину, протекает только во время переходного процесса, который составляет доли секунды.

Сечение токоподводящих проводов с учетом заданной экономической плотности тока ($\Delta = 3 \text{ А/мм}^2$) составит

$$S_{пр} = \frac{I_{л}}{\Delta} = \frac{11,92}{3} = 3,97, \text{ мм}^2.$$

По справочнику можно подобрать провод, сечение которого должно быть не меньше вычисленного.

Для определения возможности пуска двигателя при номинальной нагрузке и пониженном напряжении необходимо определить величины номинального и пускового моментов.

Вращающий момент на валу двигателя:

$$M = CU^2 ,$$

где C – постоянный коэффициент, зависящий от конструктивных особенностей двигателя;

U – подводимое к статору напряжение.

Номинальный момент двигателя при номинальном напряжении

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 \frac{P_{2\text{H}}}{n_{2\text{H}}} = 9,55 \cdot \frac{3000}{1434} = 19,98, \text{ Нм} \approx 20, \text{ Нм.}$$

$$M_{\text{НОМ}} = C(U_{\text{H}})^2 .$$

Пусковой момент при номинальном напряжении определяют исходя из известной кратности пускового момента

$$\beta = \frac{M_{\text{П}}}{M_{\text{НОМ}}}, \implies M_{\text{П}} = \beta M_{\text{НОМ}} = 1,2 \cdot 19,98 = 23,98, \text{ Нм} \approx 24, \text{ Нм}$$

При понижении напряжения на 10% подводимое напряжение станет $U' = 0,9U_{\text{H}}$, вращающий момент при той же самой нагрузке изменится

$$M' = C(U')^2 = C(0,9U_{\text{H}})^2 = 0,81CU_{\text{H}}^2 = 0,81M_{\text{НОМ}} = 0,81 \cdot 20 = 16,2 \text{ Нм}$$

Соответственно, пусковой момент при пониженном напряжении составит

$$M'_{\text{П}} = \beta M' = 1,2 \cdot 16,2 = 32,4, \text{ Нм.}$$

Сравниваем этот момент с номинальным – $M'_{\text{П}} \geq M_{\text{НОМ}}$ т.е. пуск возможен.

Для *понижения пусковых токов* часто пуск асинхронных двигателей осуществляют при пониженном напряжении. Двигатели, работающие при соединении обмоток статора по схеме «треугольник», пускают без нагрузки путем включения обмоток статора на время пуска по схеме «звезда». Определим пусковой момент двигателя при данном виде пуска.

В момент пуска обмотки находятся под напряжением $U_{\text{ф}} = U_{\text{л}}/\sqrt{3} = 220/\sqrt{3} = 127, \text{ В}$, что составляет 57,7% от U_{H} , пусковой момент при этом:

$$M_{\Pi} = CU^2 = C(0,577U_{\text{H}})^2 = 0,33CU_{\text{H}}^2 = 0,33M_{\text{H}} = 0,33 \cdot 20 = 6,6, \text{ Нм.}$$

Полученный момент меньше номинального, именно поэтому пуск осуществляют в режиме холостого хода. После разгона двигателя обмотки переключают на схему «треугольник» и нагружают двигатель номинальным моментом.

Пусковой ток при этом уменьшится в $\sqrt{3}$ раз по сравнению с прямым пуском по схеме «треугольник» и составит:

$$I'_{\Pi} = \frac{I_{\Pi}}{\sqrt{3}} = \frac{71,52}{\sqrt{3}} = 41,3, \text{ А.}$$

Это один из экономичных и эффективных методов уменьшения бросков пусковых токов, но он возможен только в случае, если есть возможность пуска при холостом ходе.

Задача 3.4.

По паспортным данным асинхронного двигателя постройте естественную механическую характеристику.

Тип	P_{H} кВт	U_{H} В	n_{H} об/мин	η_{H} %	$\text{Cos}\varphi_{\text{H}}$	$\alpha =$ I_{Π}/I_{H}	$\beta =$ $M_{\Pi}/M_{\text{НОМ}}$	$\lambda =$ $M_{\text{п}}/M_{\text{НОМ}}$
5A200L6	30.0	380/660	975	90.5	0,84	6,0	2,2	2,4

Представленный асинхронный двигатель 5A200L6:

5А – асинхронный двигатель 5 серии;

А – станина и щиты алюминиевые;

200 – высота оси вращения, мм;

L – большая длина корпуса по установочным размерам (Long);

6 – число полюсов т.е. $p = 3$, ($n_1 = 1000$ об/мин).

Механическая характеристика двигателя является основной характеристикой и представляет собой зависимость $M = f(n_2)$, а в свою очередь $n_2 = f(s)$.

Механическая характеристика строится по четырем основным и нескольким вспомогательным токам. Основные точки следующие:

1. *Режим холостого хода:* $M = 0$, $s = 0$, $n_2 = n_1 = 1000$ об/мин.

$$n_1 = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000, \text{ об/мин.}$$

2. *Номинальный режим:* $M = M_{\text{н}}$, $s = s_{\text{н}}$, $n_2 = n_{\text{н}}$.

Номинальный вращающий момент двигателя:

$$M_{\text{ном}} = 9,55 \frac{P_{2\text{н}}}{n_{2\text{н}}} = 9,55 \cdot \frac{30000}{975} = 293,8, \text{ Нм} \approx 294, \text{ Нм.}$$

Номинальная частота вращения

$$n_2 = n_{\text{н}} = 975, \text{ об/мин.}$$

Номинальное скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = \frac{1000 - 975}{1000} = 0,025 \text{ или } 2,5\%.$$

3. *Критическая точка:* $M = M_{\text{м}}$, $s = s_{\text{кр}}$, $n_2 = n_{\text{кр}}$.

Максимальный момент определяется по заданной перегрузочной способности двигателя:

$$M_{\text{м}} = \lambda M_{\text{ном}} = 2,4 \cdot 294 = 705,6, \text{ Нм.}$$

Критическое скольжение – $s_{\text{кр}}$, при котором асинхронная машина развивает максимальный вращающий момент.

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{н}} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) = 0,025 \left(2,4 + \sqrt{(2,4)^2 - 1} \right) = 0,114.$$

Используя основную формулу скольжения можно определить $n_{\text{кр}}$:

$$n_{\text{кр}} = n_1 (1 - s_{\text{кр}}) = 1000 (1 - 0,114) = 886, \text{ об/мин}$$

4. *Момент пуска:* $M = M_{\text{п}}$, $s = 1$, $n_2 = 0$.

Пусковой момент определяется по заданной кратности пускового момента β

$$M_{\text{п}} = \beta M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 294 = 646,8, \text{ Нм.}$$

Для расчета промежуточных точек воспользуемся упрощенной формулой, которая позволяет определить момент при любых значениях скольжения:

$$M = \frac{2M_{\text{м}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}.$$

Следует только учесть, что эта формула наиболее точно описывает механическую характеристику на участке устойчивой работы (от холостого хода до достижения максимального момента), на участке неустойчивой работы и, особенно при значениях скольжения, близких к пусковым, появляется значительная погрешность. Двигатели рассматриваемой серии конструктивно выполнены с глубоким пазом, то есть с улучшенными пусковыми свойствами, а в данной формуле это не учтено.

Выбираются две промежуточные расчетные точки при значениях скольжения в диапазоне устойчивой работы двигателя: 0,02 (интервал между точкой холостого хода и номинальным режимом) и 0,1 (интервал между номинальным режимом и критической точкой). Скорость вращения ротора n_2 при этих скольжениях вычисляем исходя из основной формулы скольжения

$$n_2 = n_1 (1 - s).$$

Результаты расчета механической характеристики сводим в таблицу:

s	0	0,01	$s_H = 0,025$	0,05	$s_{кр} = 0,114$	$s_H = 1$
$M, \text{Нм}$	0	122,8	294,3	519,1	705,6	646,8
$n_2, \text{об/мин}$	1000	990	975	950	886	0

Механическая характеристика имеет вид, представленный на рис. 3.3.

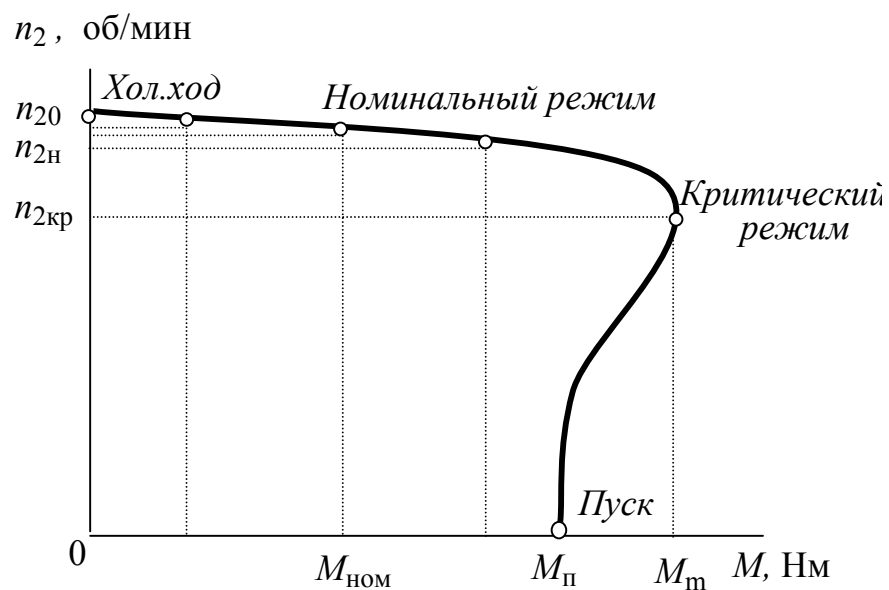


Рис. 3.3

Участок характеристики от холостого хода до критической точки является участком устойчивой работы двигателя, на нем выполняется принцип саморегулирования – двигатель самостоятельно пристраивается к изменившемуся моменту нагрузки и обеспечивает устойчивое вращение при другой частоте вращения.

Индивидуальные задания

Задачи 3.1 и 3.2 разберите по готовому решению, задачи 3.3 и 3.4 решите в соответствии с индивидуальным заданием по вариантам, которые выдаются преподавателем (табл. 3.1) или соответствуют порядковому номеру в журнале.

Таблица 3.1

Технические характеристики асинхронных электродвигателей

	Тип двигателя	P_H кВт	$U_{НОМ}$ В	n_H об/мин	η %	$\cos \varphi_H$	α	β	λ	ΔU %
1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
$U_{сети} = 380 \text{ В}$										
1	4A50B2	0,12	380	2710	63,0	0,70	4,0	2,0	2,2	10
2	RA200L8	15	380	730	88,0	0,8	5,7	2,0	2,5	7
3	АИР315S6	110	220/380	987	93,0	0,92	6,0	1,4	2,3	15
4	5A80MA2	1,5	380	2850	80,0	0,84	6,5	2,4	2,5	20
5	4A56B4	0,18	380	1365	64,0	0,64	3,5	2,1	2,2	5
6	5AM112M4	5,5	380	1440	86,0	0,83	6,7	2,6	2,9	6
7	RA208	15	380/660	730	88,0	0,8	5,7	2,0	2,5	7
8	АИР315S6	110	220/380	987	93,0	0,92	6,0	1,4	2,3	10
9	4A63B2	0,55	380	2740	73,0	0,86	4,5	2,0	2,2	8
10	5A160S4	15,0	380	1450	89,5	0,86	6,1	2,2	2,6	10
11	4A1606	11,0	380/660	975	86,0	0,86	6,0	1,2	2,2	12
12	5A80MA8	0,37	380	695	56,0	0,62	3,5	2,0	2,2	6
13	RA132SA2	5,5	380	2880	89,0	0,89	6,5	2,4	3,0	11
14	АИР112M8	3,0	220/380	708	79,0	0,74	6,0	1,8	2,2	13

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	6	7	8	9	10	11	12
15	4A1602	15,0	380/660	2940	88,0	0,91	7,0	1,4	2,2	10
16	RA200LB4	37,0	380/660	1450	92,0	0,89	7,5	2,6	2,8	12
17	6A132SA2	5,5	380/660	2915	87,0	0,87	7,5	2,5	3,3	6
$U_{\text{сети}} = 660 \text{ В}$										
18	5A80MA	1,1	380/660	1410	73,0	0,79	4,8	2,0	2,3	7
19	4A200M6	22,0	660	975	90,0	0,90	6,5	1,3	2,4	10
20	5A160S6	11,0	380/660	970	87,0	0,82	6,5	1,9	2,5	8
21	RA200LA2	30,0	380/660	2950	92,0	0,89	7,5	2,4	3,0	10
22	AIP112MB8	5,5	660	712	83,0	0,74	6,0	1,8	2,2	8
23	4A280M8	75,0	380/660	735	92,5	0,85	5,5	1,2	2,0	15
24	5AM315S12	45,0	380/660	490	93,0	0,79	5,6	1,8	2,0	11
25	6AM200LA2	30,0	380/660	2940	91,5	0,89	6,8	2,1	3,0	13
26	4A250S8	37,0	660	735	90,0	0,83	6,0	1,2	2,0	7
27	RA180L4	22,0	660	1480	91,0	0,88	7,0	2,1	2,9	13
28	AIP250S4	75,0	380/660	1477	94,0	0,88	7,5	1,7	2,5	7
29	AIP112MB8	110	380/660	738	93,0	0,86	6,0	1,1	2,2	6
30	6A315S2	110	660	2965	93,5	0,92	6,5	1,6	2,3	18

Методические рекомендации

1) При определении схемы включения в сеть обмоток статора следует учесть, что номинальное напряжение двигателя:

- 380 В соответствует соединению обмоток двигателя – «звезда»;
- 660 В соответствует соединению обмоток двигателя – «звезда»;
- 220/380, 380/660 соответствует соединению обмоток двигателя – «треугольник»/«звезда».

Примеры обозначения асинхронных двигателей:

— 5A250M-4

5A – асинхронный двигатель 5 серии;

250 – высота оси вращения, мм;

M – длина средняя корпуса по установочным размерам;

4 – число полюсов (1500 об/мин).

— RA100M4

RA – российский асинхронный двигатель;

100 – высота оси вращения, мм;

M – длина средняя корпуса по установочным размерам;

4 – число полюсов (1500 об/мин).

— 4A200L4УЗ

4A – асинхронный двигатель 4 серии закрытый обдуваемый;

200 – высота оси вращения, мм;

L – большая длина корпуса по установочным размерам,

4 – число полюсов (1500 об/мин);

У – для районов с умеренным климатом,

3 – категория размещения -для эксплуатации в закрытых помещениях с естественной вентиляцией без искусственно регулируемых климатических условий.

— AИP250S6

AИP – асинхронный двигатель серии AИP: разработка этой серии базировалась, кроме отечественных стандартов, на рекомендациях МЭК (Международной электротехнической комиссии);

250 – высота оси вращения, мм;

S – малая длина корпуса по установочным размерам;

6 – число полюсов (1000 об/мин).

3.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 3.5

Определить ЭДС E_1 и E_2 , индуцируемые в фазах обмоток статора и ротора трехфазного асинхронного двигателя, и частоту тока в роторе при неподвижном и вращающемся роторе, если номинальное скольжение $s = 3,3 \%$, число витков обмотки статора

$W_1 = 118$, ротора $W_2 = 24$, обмоточные коэффициенты обмоток $K_{об} = 0,95$, магнитный поток $\Phi_m = 0,872 \cdot 10^{-2}$ Вб, частота напряжения питающей сети $f = 50$ Гц.

Ответ: $E_1 = 217$ В; $E_2 = 1,46$ В; $f_2 = 1,65$ Гц.

Задача 3.6.

Короткозамкнутый трехфазный асинхронный двигатель имеет следующие паспортные данные: $P_{ном} = 5,5$ кВт, $n_{ном} = 1450$ об/мин, $U_H = 220/380$ В, $\cos\varphi_H = 0,83$. Определите число пар полюсов двигателя, скольжение и пусковой ток при включении в сеть напряжением $U_{сети} = 380$ В, если кратность пускового тока равна 5,0.

Ответ: $p = 2$; $s = 3,3$ %; $I_{п} = 86,8$ А.

Задача 3.7.

По паспортным данным асинхронного двигателя постройте естественную механическую характеристику и определите, возможен ли запуск двигателя при снижении напряжения на 15 %.

Тип	P_H кВт	U_H В	n_H об/мин	η_H %	$\cos\varphi_H$	$\alpha =$ $I_{п}/I_H$	$\beta =$ $M_{п}/M_H$	$\lambda =$ $M_{м}/M_H$
АИР180М6	18,50	220/380	980	89,5	0,84	6,0	1,9	2,7

Ответ: $M_H = 180$ Нм; $M_{м} = 486$ Нм; $M_{п} = 342$ Нм; $n_{кр} = 896$ об/мин.

Задача 3.8.

По паспортным данным асинхронного двигателя изобразите схему включения двигателя в сеть 380 В, определите сечение токоподводящих проводов и пусковой ток. Поясните, как можно уменьшить этот пусковой ток?

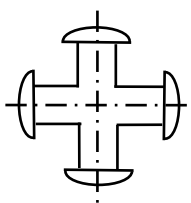
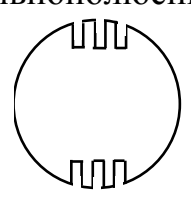
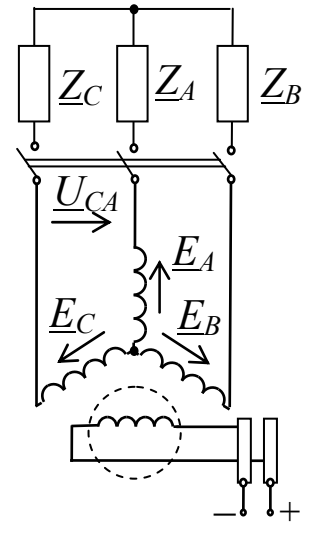
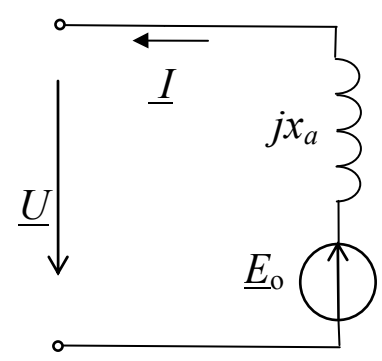
Тип	P_H кВт	U_H В	n_H об/мин	η_H %	$\cos\varphi_H$	$\alpha =$ $I_{п}/I_H$	$\beta =$ $M_{п}/M_H$	$\lambda =$ $M_{м}/M_H$
5АМ280S10	37,0	380/660	590	93,5	0,79	6,5	1,5	2,5

Ответ: $S = 25,37$ мм²; $I_{п} = 494,7$ А.

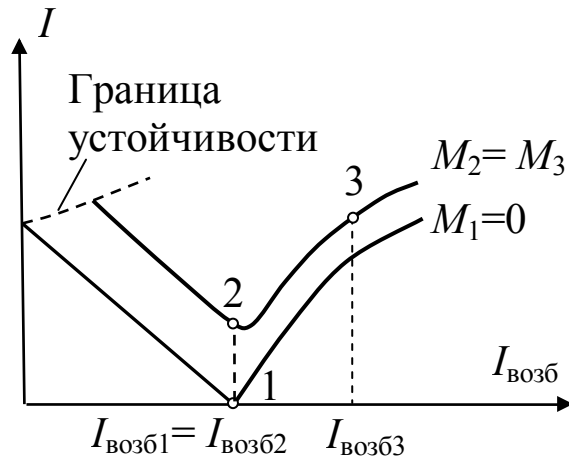
Практическое занятие № 4

РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННЫХ МАШИН

4.1. Краткие теоретические сведения

<i>Устройство синхронных машин</i>	
<p>В теории синхронных машин отсутствует понятие «скольжение», поскольку скорость вращения ротора n равна скорости вращения магнитного поля n_0, создаваемого токами трехфазной обмотки статора, и сохраняется постоянной независимо от нагрузки</p> $n_0 = \frac{60 f_1}{p};$ <p>где p – число пар полюсов генератора.</p>	<p style="text-align: center;">Ротор явнополюсный:</p>  <p style="text-align: center;">Ротор неявнополюсный:</p>  <p style="text-align: center;">Электромагнитная схема синхронной машины:</p> 
<i>Анализ работы синхронного генератора</i>	
<p>Уравнение электрического состояния фазы обмотки статора:</p> $\underline{U} = \underline{E}_0 - jx_a \underline{I},$ <p>где \underline{U} – фазное напряжение обмотки статора (якоря); \underline{E}_0 – ЭДС, индуцируемая основным магнитным полем, создаваемым током возбуждения ($I_{\text{возб}}$) обмотки ротора; x_a – синхронное сопротивление машины (активное принимается равным нулю); \underline{I} – фазный ток обмотки статора</p>	<p>Схема замещения фазы обмотки статора синхронного генератора:</p> 

U-образные характеристики синхронного генератора:

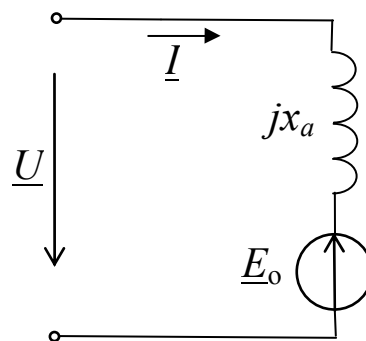


Анализ работы синхронного двигателя

Уравнение электрического состояния фазы обмотки статора:

$$\underline{U} = \underline{E}_o + jx_a \underline{I}$$

Схема замещения фазы обмотки статора синхронного двигателя:



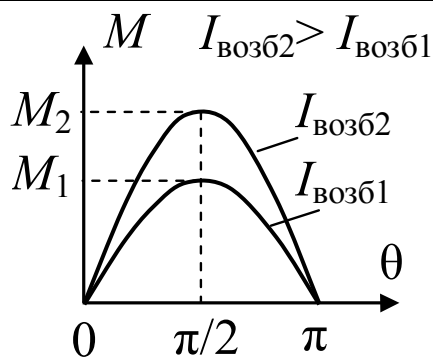
Угловая характеристика синхронного двигателя:

$$M = \frac{3UE_o}{x_a \Omega_0} \sin \theta,$$

где θ – угол рассогласования, характеризующий пространственное смещение осей симметрии поля тока ротора и результирующего магнитного поля;

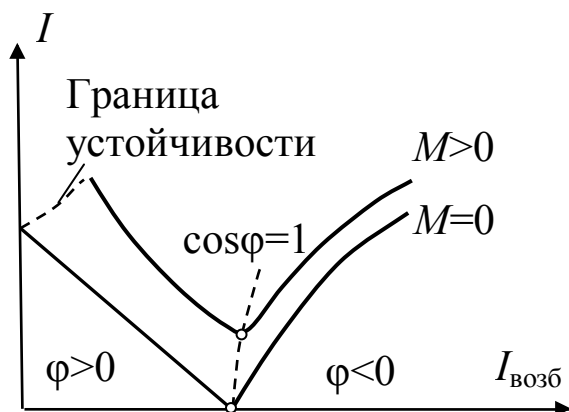
$\Omega_0 = \frac{2\pi f}{p}$ – угловая скорость вращения ротора;

U – фазное напряжение обмотки статора.



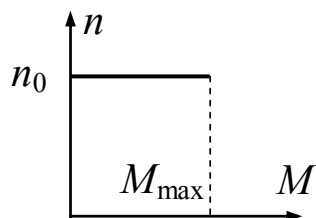
В диапазоне $0 < \theta < \pi/2$ – режим устойчивой работы двигателя;
 в диапазоне $\pi/2 < \theta < \pi$ – режим неустойчивой работы двигателя

U-образные характеристики синхронного двигателя:



Область $\varphi > 0$ соответствует режиму недо возбуждения двигателя;
 область $\varphi < 0$ соответствует режиму перевозбуждения двигателя

Механическая характеристика синхронного двигателя:



4.2. Типовые задачи

Задача 4.1.

Трехфазный четырехполюсный синхронный двигатель с номинальной мощностью 500 кВт и номинальным напряжением 0,66 кВ, работающий при частоте 50 Гц, имеет следующие паспортные данные: номинальный КПД 0,95, номинальный коэффициент мощности 0,8 (при токе, опережающем по фазе напряжение). Найдите скорость вращения ротора, номинальный вращающий момент, активную и реактивную мощности, потребляемые из сети, ток обмотки статора и его реактивную составляющую.

Решение

Скорость вращения ротора

$$n_{\text{ном}} = n_0 = 60f/p = 3000/2 = 1500, \text{ об/мин.}$$

Номинальный вращающий момент

$$M_{\text{ном}} = 9,55P_{\text{ном}}/n_{\text{ном}} = 9,55 \cdot 500 \cdot 10^3 / 1500 = 3183, \text{ Нм.}$$

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети в номинальном режиме,

$$P_1 = P_{\text{ном}}/\eta_{\text{ном}} = 500 \cdot 10^3 / 0,95 = 526 \cdot 10^3, \text{ Вт.}$$

Ток обмотки статора, потребляемый в номинальном режиме,

$$I_1 = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ном}} \cos \varphi} = \frac{526 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 660 \cdot 0,8} = 575 \text{ А.}$$

Реактивная (емкостная) составляющая тока обмотки статора

$$I_{1 \text{ реакт}} = I_1 \sin \varphi = 575 \cdot 0,6 = 345, \text{ А.}$$

Реактивная мощность, потребляемая из сети в номинальном режиме,

$$Q_1 = \sqrt{3} U_{\text{ном}} I_1 \sin \varphi = \sqrt{3} \cdot 660 \cdot 575 \cdot 0,6 = 395, \text{ вар.}$$

Включив рассмотренный двигатель параллельно индуктивному потребителю реактивной мощности, можно разгрузить линию от 345 А реактивного тока.

Перевозбужденные синхронные двигатели широко используются для улучшения коэффициента мощности предприятий (вместо громоздких батарей конденсаторов).

Индивидуальное задание

Решите подобную задачу самостоятельно, используя приведенный алгоритм решения и данные табл. 4.1. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 4.1

Параметры	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$2p$	–	–	–	–	12	?	12	2
f , Гц	50	50	50	50	?	50	50	50
$U_{\text{НОМ}}$, В	380	660	220	660	–	–	–	–
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	?	160	25	25	10	5	5	?
$\eta_{\text{НОМ}}$, %	92	94	90	90	–	–	–	–
$\cos \varphi$	0,8	0,8	–	–	–	–	–	–
$M_{\text{НОМ}}$	–	–	–	–	95,5	47,75	?	28,65
I_1 , А	–	–	100	?	–	–	–	–
$I_{1\text{реакт}}$, А	92,5	?	–	–	–	–	–	–
Q_1 , квар	–	–	?	62,7	–	–	–	–

Задача 4.2.

Трехфазный синхронный электродвигатель имеет следующие номинальные данные: $P_{\text{НОМ}} = 1000$ кВт, $p = 3$, отношение максимального момента к номинальному $M_{\text{max}} / M_{\text{НОМ}} = 2,0$, $n_{\text{НОМ}} = 1000$ об/мин, частота питающего напряжения $f = 50$ Гц. Определите номинальное значение угловой скорости вращения, моменты электродвигателя $M_{\text{НОМ}}$ и M_{max} , угол рассогласования (нагрузки) $\theta_{\text{НОМ}}$.

Решение

Номинальная угловая скорость вращения ротора

$$\Omega_{\text{НОМ}} = \omega/p = 2\pi f/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/3 = 104,7, \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент электродвигателя

$$M_{\text{НОМ}} = 9,55 P_{\text{НОМ}} / n_{\text{НОМ}} = 9,55 \cdot 1000 \cdot 10^3 / 1000 = 9,55 \cdot 10^3, \text{ Нм.}$$

Максимальный момент электродвигателя

$$M_{\text{max}} = 2,0 \cdot M_{\text{НОМ}} = 2,0 \cdot 9,55 \cdot 10^3 = 19,1 \cdot 10^3, \text{ Нм.}$$

Номинальный угол рассогласования может быть найден следующим образом.

Из рассмотрения уравнения угловой характеристики

$$M = \frac{3UE_0}{x_a\Omega_0} \sin \theta$$

становится ясно, что при максимально возможном $\sin \theta$ ($\sin \theta = 1$ при $\theta = 90^\circ$) момент M является максимальным

$$M = M_{\max},$$

следовательно,

$$M_{\text{НОМ}} = M_{\max} \cdot \sin \theta_{\text{НОМ}},$$

а номинальный угол рассогласования

$$\theta_{\text{НОМ}} = \arcsin (M_{\text{НОМ}} / M_{\max}) = \arcsin 0,5 = 30^\circ = \pi/6.$$

Величина угла рассогласования в номинальном режиме $\theta_{\text{НОМ}} = \pi/6$ лежит в диапазоне $0 < \theta < \pi/2$, что обеспечивает режим устойчивой работы двигателя.

Индивидуальное задание

Решите подобную задачу самостоятельно, используя приведенный алгоритм решения и данные табл. 4.2. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 4.2

Параметры	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
f , Гц	50	?	50	50	?	50	50	100
p	1	2	?	3	2	?	?	2
$P_{\text{НОМ}}$, кВт	75	160	25	?	10	5	5	?
$n_{\text{НОМ}}$, об/мин	?	1500	1000	?	?	?	?	?
$M_{\max}/M_{\text{НОМ}}$	2	?	2	1,8	?	1,8	?	?
$M_{\text{НОМ}}$, Нм	?	?	?	238,75	?	31,83	?	?
M_{\max} , Нм	?	?	?	?	?	?	?	?
$\Omega_{\text{НОМ}}$, об/с	?	?	?	?	314	?	157	?
$\theta_{\text{НОМ}}$, рад	?	$\pi/6$?	?	$\pi/4$?	$\pi/3$	$\pi/6$

Задача 4.3.

Постройте угловую характеристику шестиполюсного синхронного двигателя при номинальной нагрузке и номинальном возбуждении. Отметьте на угловой характеристике точку, соответствующую номинальному режиму работы двигателя. Номинальные данные двигателя: $P_{\text{ном}} = 990$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $f = 50$ Гц, $x_a = 42$ Ом, $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (опереж.), $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,2$.

Решение

Номинальная угловая скорость вращения ротора

$$\Omega_{\text{ном}} = \omega/p = 2\pi f/p = 2 \cdot 3,14 \cdot 50/3 = 104,7, \text{ рад/с.}$$

Номинальный момент электродвигателя

$$M_{\text{ном}} = P_{\text{ном}} / \Omega_{\text{ном}} = 990 \cdot 10^3 / 104,7 = 9,45 \cdot 10^3, \text{ Нм.}$$

Максимальный момент

$$M_{\text{max}} = 2,2M_{\text{ном}} = 2,2 \cdot 9,45 \cdot 10^3 = 20,80 \cdot 10^3, \text{ Нм.}$$

Синус угла рассогласования $\sin\theta_{\text{ном}}$ при номинальной нагрузке определяется из уравнения угловой характеристики двигателя

$$\sin\theta_{\text{ном}} = (M_{\text{ном}} / M_{\text{max}}) = 1/2,2 = 0,4545,$$

следовательно,

$$\theta_{\text{ном}} = 27^\circ.$$

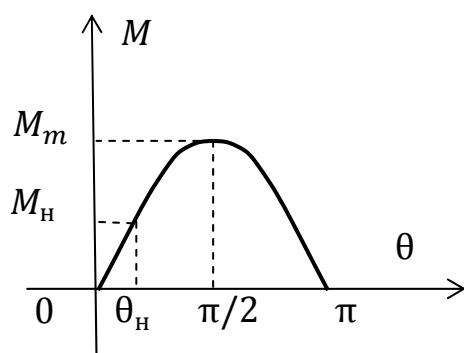


Рис. 4.1

Угловая характеристика $M(\theta)$ (рис.4.1) строится согласно синусоидальному закону изменения момента в зависимости от угла рассогласования; на ней отмечается рабочая точка, соответствующая номинальному режиму работы двигателя.

Индивидуальное задание

Решите подобную задачу самостоятельно, используя приведенный алгоритм решения и данные табл. 4.3. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 4.3

Параметры	Вариант							
	1	2	3	4	5	6	7	8
f , Гц	50	50	–	50	50	–	50	–
$2p$	4	6	–	4	4	–	6	–
$P_{\text{ном}}$, кВт	500	1000	–	1600	–	1250	–	630
$U_{\text{ном}}$, кВ	0,66	6	6	6	6	6	6	0,8
$n_{\text{ном}}$	–	–	1000	–	–	3000	–	1000
$M_{\text{ном}}$	–	–	19,10	–	6,37	–	23,88	–
M_{max}	–	–	42,02	–	12,74	–	–	12,04
$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}}$	2	2	–	2,10	–	2,10	2	–
$\cos \varphi_{\text{ном}}$ (опереж.)	0,8	0,8	0,7	0,7	0,8	0,8	0,7	0,8
x_a , Ом	42	20	16	20	16	20	10	42

Задача 4.4.

Постройте векторную диаграмму напряжений, ЭДС и тока шестиполусного синхронного двигателя при номинальной нагрузке и номинальном возбуждении на основе результатов решения задачи 1.3. Определите величину тока.

Решите подобную задачу самостоятельно, используя приведенный алгоритм решения и данные табл. 4.3. Номер варианта выдается преподавателем.

Решение

1. Величина ЭДС E_0 при номинальной нагрузке и номинальном возбуждении находится из формулы амплитуды угловой характеристики $M(\theta)$ следующим образом

$$E_0 = x_a \cdot \Omega_{\text{ном}} \cdot M_{\text{max}} / 3 \cdot U = 42 \cdot 104,7 \cdot 20,80 \cdot 10^3 / (3 \cdot (6 \cdot 10^3 / \sqrt{3})) = 8801,31, \text{ В.}$$

2. Для построения векторной диаграммы напряжений, ЭДС и тока (рис. 4.2) согласно уравнению электрического состояния фазы обмотки статора

$$\underline{U} = \underline{E}_o + jx_a \underline{I}$$

выбираются масштабы напряжения m_U [В/см] и тока m_I [А/см]. С учетом выбранного масштаба напряжения вертикально проводится вектор \underline{U} , соответствующий фазному напряжению питающей двигатель сети, под углом θ к нему – вектор ЭДС \underline{E}_o и вектор падения напряжения на синхронном сопротивлении $jx_a \underline{I}$, как разность уже построенных векторов.

Вектор тока \underline{I} отстает от вектора падения напряжения на 90° и опережает вектор фазного напряжения на угол $\varphi = 36,87^\circ$, так как по условию задачи синхронный двигатель работает в режиме перевозбуждения.

Из векторной диаграммы следует, что

$$E_o \cdot \sin \theta = x_a \cdot I \cdot \cos \varphi,$$

откуда определяется величина тока

$$I = E_o \cdot \sin \theta / (x_a \cdot \cos \varphi) = 8801,31 \cdot \sin 27^\circ / (42 \cdot 0,8) = 119, \text{ А.}$$

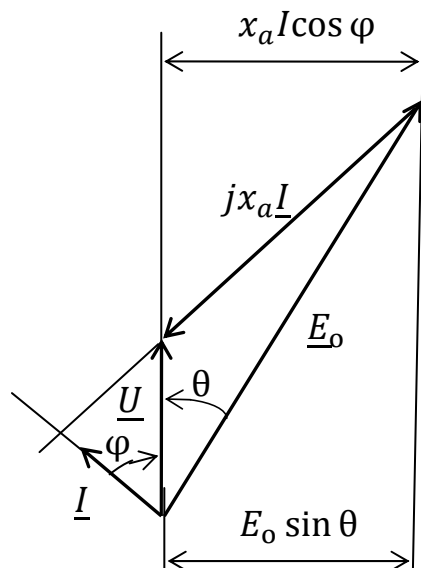


Рис. 4.2

4.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 4.5.

Синхронный двигатель, включенный в сеть большой мощности с номинальным напряжением 220 В и частотой 50 Гц, имеет номинальную мощность 1240 Вт, номинальный КПД 94 % и работает в режиме перевозбуждения с углом рассогласования 15° .

Определите E_0 и ток фазы обмотки статора, если синхронное сопротивление машины 20 Ом.

Рекомендация: в процессе решения воспользуйтесь векторной диаграммой нагруженного синхронного двигателя.

Ответ: $E_0 = 267,5$ В; $I_{\text{ном}} = 7,4$ А.

Задача 4.6.

Синхронный двигатель имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{ном}} = 2700$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $x_a = 16$ Ом, $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$ (емк.). Определите ток обмотки статора и угол рассогласования, если двигатель нагружен моментом $M = 3,14 \cdot 10^3$ Нм, работает с коэффициентом мощности 0,7 (емк.) и КПД 94%,

Рекомендация: в процессе решения воспользуйтесь векторной диаграммой нагруженного синхронного двигателя.

Ответ: $I = 144,3$ А; $\theta = 17,5^{\circ}$.

Задача 4.7.

Определите номинальный момент, отношение $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}}$, а также $\theta_{\text{ном}}$ перевозбужденного синхронного двигателя со следующими паспортными данными: $P_{\text{ном}} = 990$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\eta_{\text{ном}} = 93\%$, $x_a = 42$ Ом, $n_{\text{ном}} = 3000$ об/мин, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$.

Рекомендация: в процессе решения воспользуйтесь векторной диаграммой нагруженного синхронного двигателя.

Ответ: $M_{\text{ном}} = 3151,3$ Нм; $M_{\text{max}} / M_{\text{ном}} = 2$; $\theta_{\text{ном}} = 33^{\circ}$.

Задача 4.8.

Синхронный двигатель имеет следующие паспортные данные: $P_{\text{ном}} = 4000$ кВт, $U_{\text{ном}} = 6$ кВ, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,9$ (емк.), $f = 50$ Гц, $2p = 2$, $x_a = 10$ Ом. Определите ток I фазы обмотки статора, E_o и угол рассогласования, если двигатель нагружен моментом $M = 10 \cdot 10^3$ Нм, работает с $\cos \varphi = 1$ и $\eta = 95\%$.

Рекомендация: в процессе решения воспользуйтесь векторной диаграммой нагруженного синхронного двигателя.

Ответ: $I = 318,1$ А; $E_o = 4702,7$ В; $\theta = 43^\circ$.

Задача 4.9.

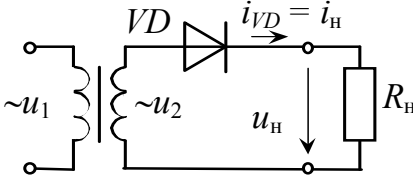
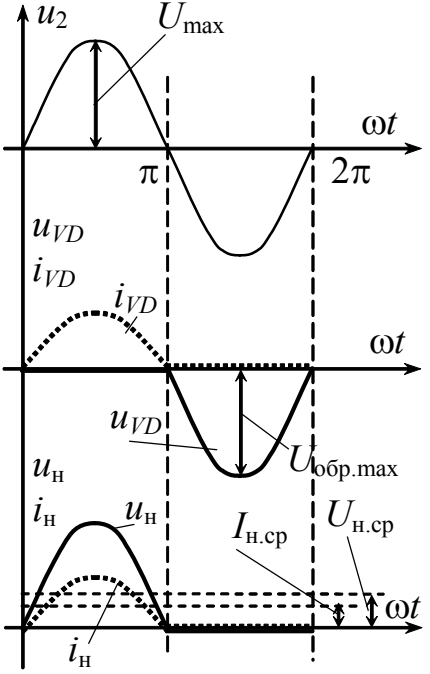
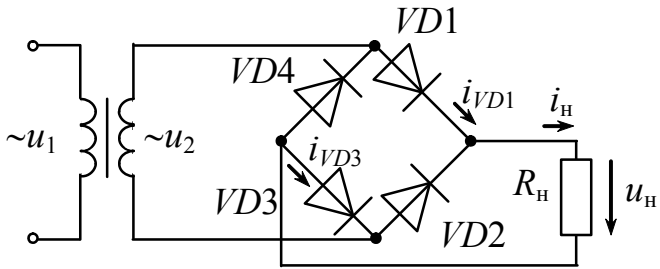
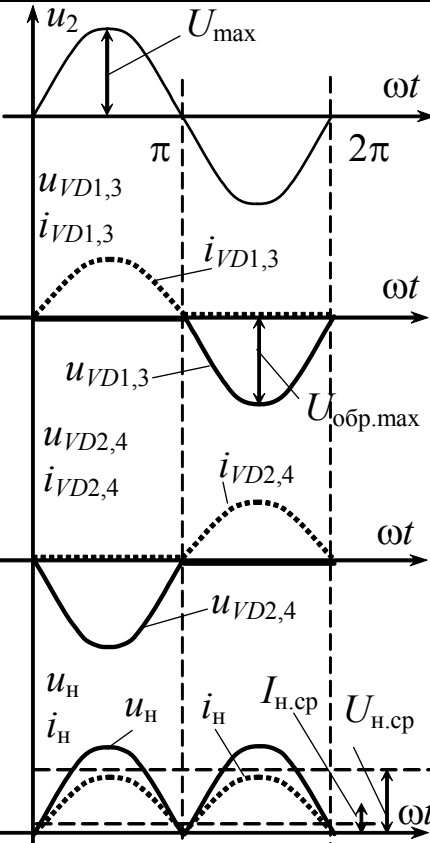
Определите номинальные значения момента, тока фазы обмотки статора и синуса угла рассогласования перевозбужденного шестиполюсного синхронного двигателя со следующими паспортными данными: $P_{\text{ном}} = 285$ кВт, $U_{\text{ном}} = 3$ кВ, $\cos \varphi_{\text{ном}} = 0,8$, $\eta_{\text{ном}} = 92\%$, $f = 50$ Гц, $M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 2,2$.

Ответ: $M_{\text{ном}} = 2721,5$ Нм; $I_{\text{ном}} = 74,5$ А; $\sin \theta_{\text{ном}} = 0,45$.

Практическое занятие № 5 РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

5.1. Краткие теоретические сведения

5.1.1. Однофазные выпрямители

Однополупериодная схема выпрямления	Временные диаграммы
 <p style="text-align: center;">Рис. 5.1</p> <p>Разложение в ряд Фурье</p> $u_H(t) = \frac{2}{\pi} U_{\max} \left(\frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \dots \right).$ <p>Среднее значение выпрямленного напряжения</p> $U_H = U_{H, \text{cp}} = \frac{U_{\max}}{\pi}.$ <p>Обратное напряжение $U_{\text{обр. max}} = U_{\max}.$ Ток нагрузки $I_H = I_{H, \text{cp}} = I_{VD, \text{cp}}.$ Коэффициент пульсаций $p = \frac{U_{1\text{max}}}{U_{H, \text{cp}}} = \frac{\pi}{2} \cong 1,57.$</p>	
<p style="text-align: center;"><i>Двухполупериодная мостовая схема выпрямления</i></p>  <p style="text-align: center;">Рис. 5.2</p> <p>Разложение в ряд Фурье</p> $u_H(t) = \frac{4}{\pi} U_{\max} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t - \dots \right).$ <p>Среднее значение выпрямленного напряжения</p> $U_{H, \text{cp}} = \frac{2U_{\max}}{\pi}.$ <p>Обратное напряжение $U_{\text{обр. max}} = U_{\max}.$ Ток нагрузки $I_H = I_{H, \text{cp}} = 2I_{VD, \text{cp}}.$ Коэффициент пульсаций $p = \frac{U_{1\text{max}}}{U_{H, \text{cp}}} = \frac{2}{3} \cong 0,67.$</p>	

Двухполупериодная схема выпрямления с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора

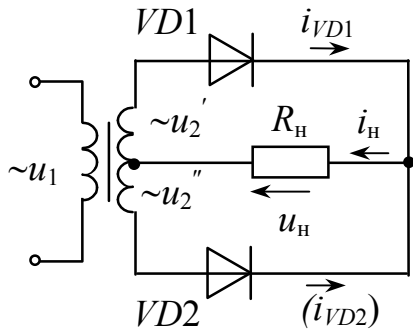


Рис. 5.3

Разложение в ряд Фурье

$$u_H(t) = \frac{4}{\pi} U_{\max} \left(\frac{1}{2} + \frac{1}{3} \cos 2\omega t - \frac{1}{15} \cos 4\omega t + \frac{1}{35} \cos 6\omega t - \dots \right)$$

Среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{H, \text{cp}} = \frac{2U_{\max}}{\pi}$$

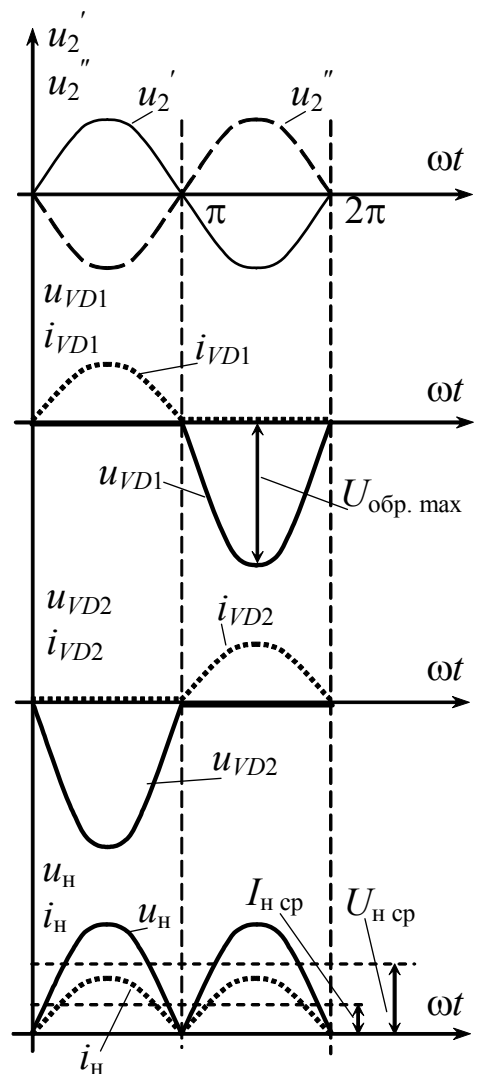
Обратное напряжение $U_{\text{обр. max}} = 2U_{\max}$.

Ток нагрузки $I_H = I_{H, \text{cp}} = 2I_{VD, \text{cp}}$.

Коэффициент пульсаций

$$p = \frac{U_{1\max}}{U_{H, \text{cc}}} = \frac{2}{3} = 0,67.$$

Временные диаграммы



5.1.2. Стабилизаторы напряжения

Параметрический стабилизатор напряжения

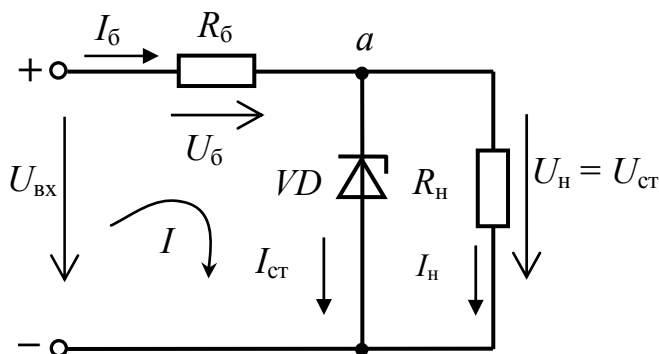


Рис. 5.4

$$U_{\text{BX}} = R_6 \left(I_{\text{CT}} + \frac{U_H}{R_H} \right) + U_H$$

Непрерывный компенсационный стабилизатор напряжения

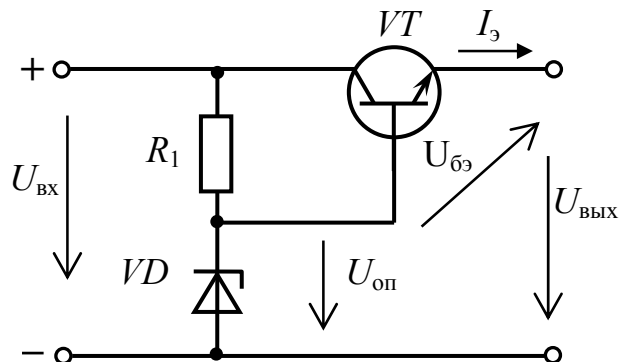


Рис. 5.5

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{оп}} - U_{\text{бэ}}$$

5.2. Типовые задачи

Задача 5.1.

В однополупериодном выпрямителе (рис. 5.1) определите коэффициент трансформации трансформатора и подберите полупроводниковый диод, если на нагрузочном резисторе $R_H = 6 \text{ кОм}$ среднее значение выпрямленного напряжения $U_{H \text{ ср}} = 270 \text{ В}$. Напряжение сети $U_1 = 380 \text{ В}$. Диод считать идеальным, т.е. $R_{\text{пр}VD} = 0$; $U_{\text{пр}VD} = 0$; $I_{\text{обр}VD} = 0$.

Решите подобную задачу для заданной выпрямительной схемы самостоятельно, используя приведенный алгоритм решения и данные табл. 5.1. Номер варианта выдается преподавателем каждому студенту индивидуально или определяется порядковым номером в журнале группы.

Таблица 5.1

№ вар.	Параметры							
	U_1 , В	U_2 , В	k_{12}	$U_{\text{обр.max}}$, В	$I_{VD \text{ ср}}$, мА	U_H , В	$I_{H \text{ ср}}$, мА	R_H , кОм
1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Однополупериодная схема выпрямления (рис. 5.1)</i>								
1	220	–	?	–	–	–	300	0,6
2	–	–	–	150	?	–	–	1
3	–	–	–	?	25	–	–	0,5
4	400	–	2	–	–	–	?	0,48
5	–	45	–	–	30	?	?	–
6	350	20	?	–	–	?	–	–
7	?	–	3	–	?	10	–	2
8	–	?	–	?	–	–	50	0,25
<i>Двухполупериодная мостовая схема выпрямления (рис. 5.2)</i>								
9	200	–	?	–	–	–	270	1
10	–	–	–	260	?	–	–	0,6
11	–	–	–	?	20	–	–	0,3
12	600	–	2	–	–	–	?	0,8
13	–	30	–	–	40	?	?	–
14	200	50	?	–	–	?	–	–
15	?	–	3	–	?	35	–	1,5
16	–	?	–	?	–	–	40	0,35

1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>Двухполупериодная схема выпрямления с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рис. 5.3)</i>								
17	350	–	?	–	–	–	320	0,8
18	–	–	–	125	?	–	–	0,48
19	–	–	–	?	75	–	–	2,5
20	800	–	4	–	–	–	?	1,4
21	–	120	–	–	10	?	?	–
22	550	80	?	–	–	?	–	–
23	?	–	2	–	?	50	–	1,3
24	–	?	–	?	–	–	70	0,2

Решение

Среднее значение напряжения на выходе однофазного однополупериодного выпрямителя и амплитудное значение напряжения на его входе связаны следующим соотношением:

$$U_{н\text{ ср}} = U_{н} = \frac{U_{2\text{ max}}}{\pi},$$

следовательно, амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора (амплитудное значение напряжения на входе однофазного однополупериодного выпрямителя) может быть определено следующим образом:

$$U_{2\text{ max}} = \pi U_{н} = \pi \cdot 270 = 848,23, \text{ В.}$$

Для определения коэффициента трансформации нужно перейти либо к действующим значениям напряжения, либо к амплитудным.

Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора:

$$U_2 = \frac{U_{2\text{ max}}}{\sqrt{2}} = \frac{848,23}{\sqrt{2}} = 599,79, \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации трансформатора:

$$k_{12} = \frac{U_1}{U_2} = \frac{380}{599,79} = 0,634.$$

Подбор диодов осуществляется по двум параметрам: максимальному обратному напряжению, которое должен выдерживать запертый диод ($U_{\text{обр. max}}$), и среднему значению тока, протекающему через открытый диод ($I_{\text{пр. VD ср}}$) за период. Значение максимального обратного напряжения, приложенного к запертому

диоду ($U_{\text{обр.мах}}$) не должно превышать максимально-допустимое постоянное обратное напряжение диода ($U_{\text{обр.мах доп}}$), иначе произойдет электрический пробой, переходящий в тепловой и диод выйдет из строя. Среднее значение тока, протекающего через открытый диод ($I_{\text{пр.VD ср}}$) за период не должно превышать максимально-допустимый максимальный средний прямой ток за период диода ($I_{\text{пр. ср. мах доп}}$), иначе произойдет перегрев диода и он выйдет из строя. Таким образом, диод подбирается исходя их условий:

$$U_{\text{обр.мах доп}} > U_{\text{обр.мах}} \qquad I_{\text{пр. ср. мах доп}} > I_{\text{VD ср.}}$$

Как видно из рис. 5.1, нагрузка $R_{\text{н}}$ и диод VD включены последовательно, следовательно, среднее значение тока нагрузки $I_{\text{н}}$ равно среднему значению тока, протекающего через диод в прямом направлении $I_{\text{пр.ср}}$, и по закону Ома для участка цепи

$$I_{\text{VD ср}} = I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{R_{\text{н}}} = \frac{270}{6000} = 0,045 = 45 \cdot 10^{-3} = 45, \text{ мА.}$$

Максимальное напряжение, действующее на закрытый диод,

$$U_{\text{обр.мах}} = U_{2 \text{ мах}} = 848,23, \text{ В.}$$

Полученным значениям удовлетворяет диод 2Д230И со следующими параметрами ($U_{\text{обр.мах доп}}$, $I_{\text{пр. ср. мах доп}}$):

$$\begin{array}{ll} U_{\text{обр.мах доп}} > U_{\text{обр.мах}} & I_{\text{пр. ср. мах доп}} > I_{\text{VD ср.}} \\ 1000 \text{ В} > 848,23 \text{ В} & 3 \text{ А} > 45 \text{ мА} \end{array}$$

Ответ: $k_{12} \approx 0,634$, диод 2Д230И.

Задача 5.2.

Определите величину балластного сопротивления $R_{\text{б}}$ параметрического стабилизатора напряжения на кремниевом стабилитроне (см. рис. 5.4), если $R_{\text{н}} = 1,125 \text{ кОм}$, стабилитрон типа Д809 с параметрами $U_{\text{ст}} = 9 \text{ В}$, $I_{\text{ст min}} = 3 \text{ мА}$, $I_{\text{ст max}} = 29 \text{ мА}$. Напряжение источника питания меняется от $U_{\text{min}} = 12 \text{ В}$ до $U_{\text{max}} = 15 \text{ В}$.

Решите подобную задачу самостоятельно, используя приведенный алгоритм решения и данные табл. 5.2. Номер варианта выдается преподавателем каждому студенту индивидуально или определяется порядковым номером в журнале группы.

Таблица 5.2

№ вар.	Параметры						
	Тип стабилизатора	$U_{ст},$ В	$I_{ст\ min},$ мА	$I_{ст\ max},$ мА	$R_H,$ Ом	$U_{min},$ В	$U_{max},$ В
1	Д816А	20	10	230	417	24	30
2	Д816В	32	10	150	1000	35	45
3	Д817	55	5	90	2895	60	90
4	Д818А	9	3	33	1250	12	17
5	КС191М	9,1	5	15	2275	12	14
6	2С101А	3,3	1	30	852	3	7
7	2С101Б	3,9	1	26	1156	3	8
8	2С101А	4,7	1	21	1709	6	9
9	2С101Б	5,6	1	18	2358	5	10
10	2С101Д	6,8	1	15	3400	8	13
11	КС196А	9,1	3	20	3165	13	20
12	КС451А	5,1	3	148	270	5	9
13	КС456	5,6	3	139	315	7	12
14	КС524Г	24	3	19	8727	32	43
15	КС527А	27	1	30	6968	29	50
16	КС533А	33	3	17	13200	43	60
17	2С101В	4,7	1	21	1709	6	8
18	Д813	13	3	20	4522	17	20
19	КС524Г	24	3	19	8727	25	35
20	КС533А	33	3	17	13200	40	50
21	КС451А	5,1	3	148	270	7	11
22	Д818А	9	3	33	1250	11	14
23	Д817	55	5	90	2895	55	75
24	КС175Е	7,5	3	17	1500	8	11

Решение

Расчет ведется по *средним* значениям величин.

Среднее значение напряжения на входе стабилизатора

$$U_{вх\ ср} = \frac{U_{min} + U_{max}}{2} = \frac{12 + 15}{2} = 13,5, \text{ В.}$$

Средняя величина тока стабилизатора

$$I_{ст\ ср} = \frac{I_{ст\ min} + I_{ст\ max}}{2} = \frac{3 + 29}{2} = 16, \text{ мА.}$$

По закону Ома для пассивного участка цепи величина тока нагрузки

$$I_H = \frac{U_H}{R_H} = \frac{U_{CT}}{R_H} = \frac{9}{1,125 \cdot 10^3} = 8 \cdot 10^{-3} = 8, \text{ мА}$$

Падение напряжения на балластном сопротивлении определяется по второму закону Кирхгофа для контура I (рис. 5.4)

$$U_{\bar{b}} + U_{CT} - U_{ВХ} = 0,$$

$$U_{\bar{b} \text{ ср}} = U_{ВХ \text{ ср}} - U_{CT} = 13,5 - 9 = 4,5, \text{ В.}$$

Величина тока балластного сопротивления определяется по первому закону Кирхгофа для узла *a* (рис. 5.4)

$$I_{\bar{b}} - I_{CT \text{ ср}} - I_H = 0,$$

$$I_{\bar{b}} = I_{CT \text{ ср}} + I_H = 16 + 8 = 24, \text{ мА.}$$

По закону Ома для пассивного участка цепи величина балластного сопротивления

$$R_{\bar{b}} = \frac{U_{\bar{b} \text{ ср}}}{I_{\bar{b} \text{ ср}}} = \frac{4,5}{24 \cdot 10^{-3}} = 187,5, \text{ Ом.}$$

Номиналы промышленно выпускаемых электронных компонентов не являются произвольными. Существуют специальные стандартизированные ряды номиналов. Номер ряда – это число элементов в нём в диапазоне от 1 до 10. Каждый ряд соответствует определённому допуску в номиналах деталей.

По ряду E24 (1,0; 1,1; 1,2; 1,3; 1,5; 1,6; 1,8; 2,0; 2,2; 2,4; 2,7; 3,0; 3,3; 3,6; 3,9; 4,3; 4,7; 5,1; 5,6; 6,2; 6,8; 7,5; 8,2; 9,1) выбирается $R_{\bar{b}} = 180 \text{ Ом}$.

Так как расчет велся по средним значениям, необходимо проверить, каков реальный рабочий диапазон стабилизатора и соответствует ли он диапазону изменения входного напряжения.

Рассчитывается наибольшее допустимое напряжение на входе стабилизатора

$$\begin{aligned} U_{ВХ \text{ max доп}} &= U_{CT} + R_{\bar{b}}(I_{CT \text{ max}} + I_H) = \\ &= 9 + 180 \cdot (29 + 8) \cdot 10^{-3} = 15,66, \text{ В,} \end{aligned}$$

а также наименьшее допустимое напряжение на входе стабилизатора:

$$\begin{aligned} U_{ВХ \text{ min доп}} &= U_{CT} + R_{\bar{b}}(I_{CT \text{ min}} + I_H) = \\ &= 9 + 180 \cdot (3 + 8) \cdot 10^{-3} = 10,98, \text{ В,} \end{aligned}$$

По полученным данным условия

$$U_{\text{вх min доп}} \leq U_{\text{min}} \text{ и } U_{\text{max}} \leq U_{\text{вх max доп}}, \text{ т.е.}$$

$$10,98 \text{ В} < 12 \text{ В} \text{ и } 15 \text{ В} < 15,66 \text{ В},$$

выполняются, следовательно, расчет выполнен верно.

5.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 5.3.

В однополупериодном выпрямителе (рис. 5.1) определите среднее значение выпрямленного напряжения, если коэффициент трансформации трансформатора $k_{12} = 2$, напряжение сети $U_1 = 220 \text{ В}$.

Ответ: $U_{\text{н ср}} = 49,5 \text{ В}$.

Задача 5.4.

Подберите полупроводниковые диоды для мостового выпрямителя (рис. 5.2), если известно, что в нагрузочном резисторе с сопротивлением $R_{\text{н}} = 600 \text{ Ом}$ выпрямленный ток $I_{\text{н}} = 300 \text{ мА}$. Найдите значение коэффициента трансформации трансформатора, подключенного к сети с напряжением $U_1 = 220 \text{ В}$.

Ответ: $k_{12} \approx 1,1$, диод 2Д7Е ($U_{\text{обр. max доп}} = 350 \text{ В}$, $I_{\text{пр. ср. max доп}} = 300 \text{ мА}$).

Задача 5.5.

Подберите полупроводниковые диоды для двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рис. 5.3), если на нагрузочном резисторе $R_{\text{н}} = 1 \text{ кОм}$ среднее значение выпрямленного напряжения $U_{\text{н ср}} = 50 \text{ В}$.

Ответ: диод 2Д7Г ($U_{\text{обр. max доп}} = 200 \text{ В}$, $I_{\text{пр. ср. max доп}} = 300 \text{ мА}$).

Задача 5.6.

Вычислите величину допустимых колебаний входного напряжения параметрического стабилизатора напряжения (рис. 9.4), выполненного на кремниевом стабилитроне типа КС175Е с параметрами $U_{\text{ст}} = 7,5 \text{ В}$, $I_{\text{ст min}} = 3 \text{ мА}$, $I_{\text{ст max}} = 17 \text{ мА}$. Балластное сопротивление $R_{\text{б}} = 100 \text{ Ом}$, $R_{\text{н}} = 1500 \text{ Ом}$.

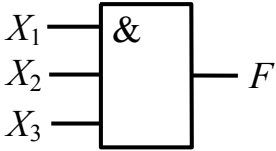
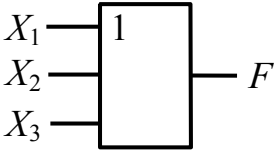
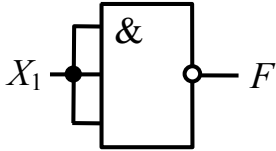
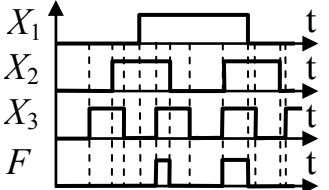
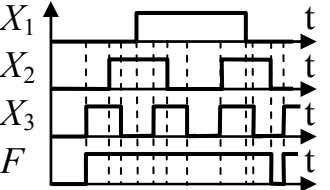
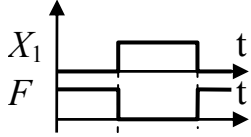
Ответ: $U_{\text{вх max}} = 8,3 \text{ В}$, $U_{\text{вх min}} = 9,7 \text{ В}$

Практическое занятие № 6

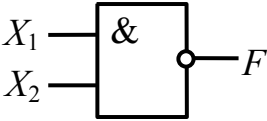
СИНТЕЗ КОМБИНАЦИОННЫХ ЛОГИЧЕСКИХ УСТРОЙСТВ В ЗАДАННОМ БАЗИСЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ

6.1. Краткие теоретические сведения

6.1.1. Базовые логические элементы (БЛЭ)

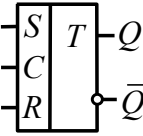
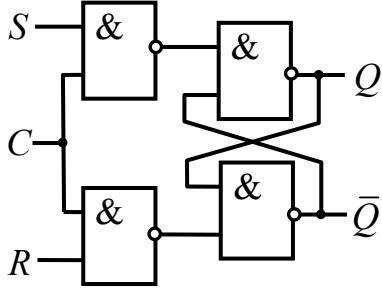
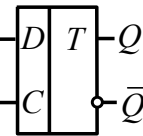
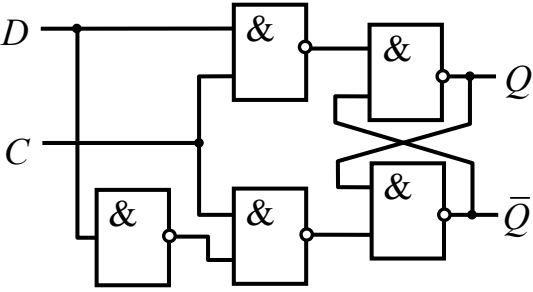
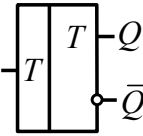
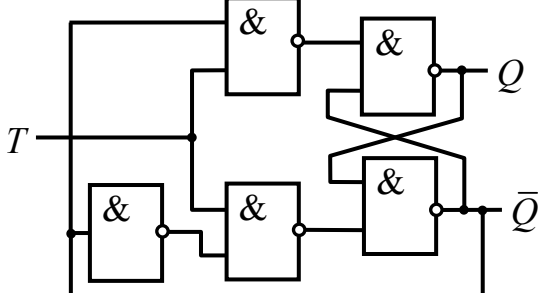
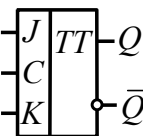
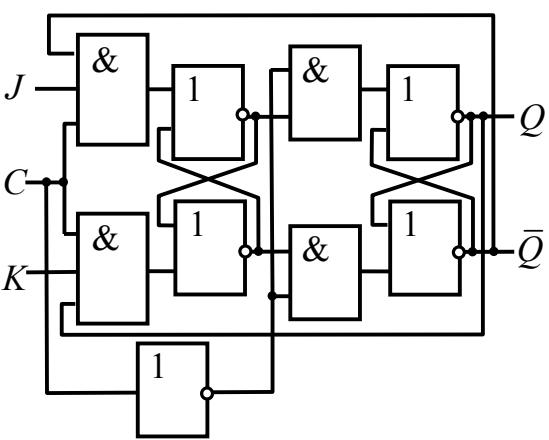
	И	ИЛИ	НЕ																																																																														
УГО																																																																																	
Реализуемые функции	$F = X_1 \wedge X_2 \wedge X_3$	$F = X_1 \vee X_2 \vee X_3$	$F = \bar{X}_1$																																																																														
Таблицы истинности	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><th>X_1</th><th>X_2</th><th>X_3</th><th>F</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	X_1	X_2	X_3	F	0	0	0	0	0	0	1	0	0	1	0	0	0	1	1	0	1	0	0	0	1	0	1	0	1	1	0	0	1	1	1	1	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><th>X_1</th><th>X_2</th><th>X_3</th><th>F</th></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table>	X_1	X_2	X_3	F	0	0	0	0	0	0	1	1	0	1	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><th>X_1</th><th>F</th></tr> <tr><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	X_1	F	0	1	1	0
X_1	X_2	X_3	F																																																																														
0	0	0	0																																																																														
0	0	1	0																																																																														
0	1	0	0																																																																														
0	1	1	0																																																																														
1	0	0	0																																																																														
1	0	1	0																																																																														
1	1	0	0																																																																														
1	1	1	1																																																																														
X_1	X_2	X_3	F																																																																														
0	0	0	0																																																																														
0	0	1	1																																																																														
0	1	0	1																																																																														
0	1	1	1																																																																														
1	0	0	1																																																																														
1	0	1	1																																																																														
1	1	0	1																																																																														
1	1	1	1																																																																														
X_1	F																																																																																
0	1																																																																																
1	0																																																																																
Временные диаграммы																																																																																	

6.1.2. Основные типы логических элементов

	Названия	Реализуемые функции	Таблицы истинности	УГО															
ИЛИ-НЕ	Стрелка Пирса	$F = \overline{X_1 \vee X_2}$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><th>X_1</th><th>0</th><th>1</th><th>0</th><th>1</th></tr> <tr><th>X_2</th><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><th>F</th><td>1</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> </table>	X_1	0	1	0	1	X_2	0	0	1	1	F	1	0	0	0	
X_1	0	1	0	1															
X_2	0	0	1	1															
F	1	0	0	0															
И-НЕ	Штрих Шеффера	$F = \overline{X_1 \wedge X_2}$	<table border="1" style="border-collapse: collapse; text-align: center;"> <tr><th>X_1</th><th>0</th><th>1</th><th>0</th><th>1</th></tr> <tr><th>X_2</th><td>0</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><th>F</th><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> </table>	X_1	0	1	0	1	X_2	0	0	1	1	F	1	1	1	0	
X_1	0	1	0	1															
X_2	0	0	1	1															
F	1	1	1	0															

6.1.3. Триггеры со статическим управлением

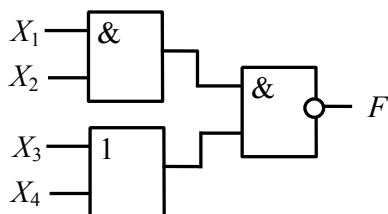
Типы	УГО	Функциональные схемы	Таблицы истинности																																																												
Асинхронный RS-триггер			<table border="1"> <thead> <tr> <th>R</th> <th>S</th> <th>Q_t</th> <th>\bar{Q}_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{t-1}</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>*</td> <td>*</td> </tr> </tbody> </table>	R	S	Q_t	\bar{Q}_t	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	*	*																																								
	R	S	Q_t	\bar{Q}_t																																																											
0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																																												
0	1	1	0																																																												
1	0	0	1																																																												
1	1	*	*																																																												
			<table border="1"> <thead> <tr> <th>\bar{S}</th> <th>\bar{R}</th> <th>Q_t</th> <th>\bar{Q}_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>0</td> <td>*</td> <td>*</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>Q_{t-1}</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> </tbody> </table>	\bar{S}	\bar{R}	Q_t	\bar{Q}_t	0	0	*	*	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																								
\bar{S}	\bar{R}	Q_t	\bar{Q}_t																																																												
0	0	*	*																																																												
0	1	1	0																																																												
1	0	0	1																																																												
1	1	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																																												
Синхронный RS-триггер			<table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>R</th> <th>S</th> <th>Q_t</th> <th>\bar{Q}_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td rowspan="4">Q_{t-1}</td> <td rowspan="4">\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{t-1}</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>*</td> <td>*</td> </tr> </tbody> </table> <p style="text-align: center;">ИЛИ</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>R</th> <th>S</th> <th>Q_t</th> <th>\bar{Q}_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>X</td> <td>X</td> <td>Q_{t-1}</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{t-1}</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>*</td> <td>*</td> </tr> </tbody> </table>	C	R	S	Q_t	\bar{Q}_t	0	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	0	1	1	0	1	1	1	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	*	*	C	R	S	Q_t	\bar{Q}_t	0	X	X	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	1	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	*	*
C	R	S	Q_t	\bar{Q}_t																																																											
0	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																																											
	0	1																																																													
	1	0																																																													
	1	1																																																													
1	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																																											
	0	1	1	0																																																											
	1	0	0	1																																																											
	1	1	*	*																																																											
C	R	S	Q_t	\bar{Q}_t																																																											
0	X	X	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																																											
1	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																																											
	0	1	1	0																																																											
	1	0	0	1																																																											
	1	1	*	*																																																											

Типы	УГО	Функциональные схемы	Таблицы истинности																																	
Синхронный RS-триггер			<table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>R</th> <th>S</th> <th>Q_t</th> <th>\bar{Q}_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="3">0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td rowspan="3">Q_{t-1}</td> <td rowspan="3">\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>*</td> <td>*</td> </tr> </tbody> </table>	C	R	S	Q_t	\bar{Q}_t	0	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	0	1	1	0	1	0	1	1	0	1	0	0	1	1	1	*	*						
C	R	S	Q_t	\bar{Q}_t																																
0	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																
	0	1																																		
	1	0																																		
1	0	1	1	0																																
	1	0	0	1																																
	1	1	*	*																																
	Синхронный D-триггер			<table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>D</th> <th>Q_t</th> <th>\bar{Q}_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="2">0</td> <td>0</td> <td rowspan="2">Q_{t-1}</td> <td rowspan="2">\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> </tr> <tr> <td rowspan="2">1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> </tbody> </table>	C	D	Q_t	\bar{Q}_t	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	1	1	0	0	1	1	1	0																
C	D	Q_t	\bar{Q}_t																																	
0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																	
	1																																			
1	0	0	1																																	
	1	1	0																																	
Асинхронный T-триггер			<table border="1"> <thead> <tr> <th>T</th> <th>Q_t</th> <th>\bar{Q}_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0</td> <td>Q_{t-1}</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> <td>Q_{t-1}</td> </tr> </tbody> </table>	T	Q_t	\bar{Q}_t	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	1	\bar{Q}_{t-1}	Q_{t-1}																								
T	Q_t	\bar{Q}_t																																		
0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																		
1	\bar{Q}_{t-1}	Q_{t-1}																																		
Синхронный JK-триггер			<table border="1"> <thead> <tr> <th>C</th> <th>J</th> <th>K</th> <th>Q_t</th> <th>\bar{Q}_t</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td rowspan="4">0</td> <td>0</td> <td>0</td> <td rowspan="4">Q_{t-1}</td> <td rowspan="4">\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td rowspan="4">1</td> <td>0</td> <td>0</td> <td>Q_{t-1}</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> </tr> <tr> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>0</td> <td>1</td> <td>0</td> </tr> <tr> <td>1</td> <td>1</td> <td>\bar{Q}_{t-1}</td> <td>Q_{t-1}</td> </tr> </tbody> </table>	C	J	K	Q_t	\bar{Q}_t	0	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	0	1	1	0	1	1	1	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	0	1	0	1	1	0	1	0	1	1	\bar{Q}_{t-1}	Q_{t-1}
C	J	K	Q_t	\bar{Q}_t																																
0	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																
	0	1																																		
	1	0																																		
	1	1																																		
1	0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}																																
	0	1	0	1																																
	1	0	1	0																																
	1	1	\bar{Q}_{t-1}	Q_{t-1}																																

6.2. Типовые задачи

Задача 6.1.

Для заданной логической схемы заполните таблицу истинности.

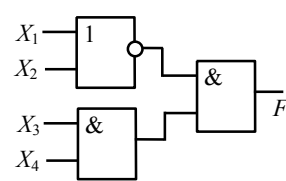
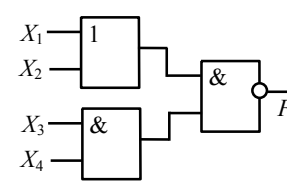
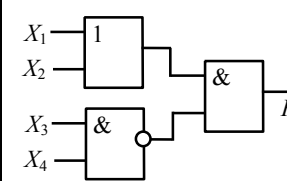
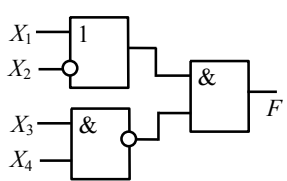
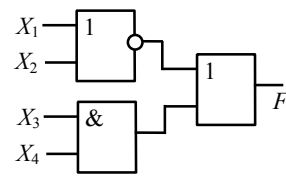
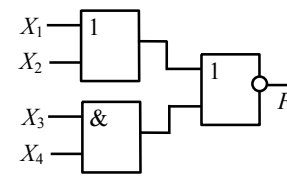
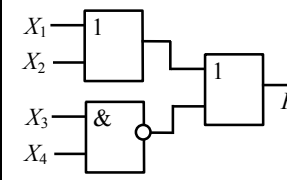
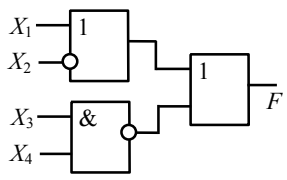


X_1	X_2	X_3	X_4	F
1	1	1	1	
1	1	0	0	
1	0	0	1	
0	0	1	1	

Решите задачу, используя данные табл. 6.1. Номер варианта выдается преподавателем. Номер варианта выдается преподавателем каждому студенту индивидуально или определяется порядковым номером в журнале группы.

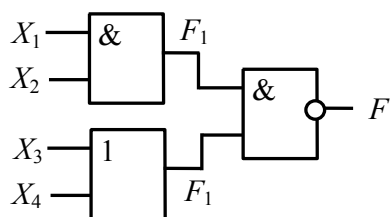
Таблица 6.1

Вариант 1	Вариант 2	Вариант 3	Вариант 4
Вариант 5	Вариант 6	Вариант 7	Вариант 8
Вариант 9	Вариант 10	Вариант 11	Вариант 12
Вариант 13	Вариант 14	Вариант 15	Вариант 16

<p>Вариант 17</p> 	<p>Вариант 18</p> 	<p>Вариант 19</p> 	<p>Вариант 20</p> 
<p>Вариант 21</p> 	<p>Вариант 22</p> 	<p>Вариант 23</p> 	<p>Вариант 24</p> 

Решение

Рассматривается работа каждого логического элемента, входящего в состав логической схемы отдельно (рис. 6.1, а), результаты заносятся в таблицу истинности (рис. 6.1, б).



а

X_1	X_2	X_3	X_4	$F_1 = X_1 \wedge X_2$	$F_2 = X_3 \vee X_4$	$F = \overline{F_1 \wedge F_2}$
1	1	1	1	1	1	0
1	1	0	0	1	0	1
1	0	0	1	0	1	1
0	0	1	1	0	1	1

б

Рис. 6.1

Задача 6.2.

Постройте комбинационное устройство, реализующее функцию $F = \overline{X_1 \wedge X_2 \vee X_3 \wedge X_4 \vee X_1}$.

Решите задачу, используя данные табл. 6.2. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 6.2

Вариант	Функция	Вариант	Функция
1	$F = \overline{X_1 \vee X_2 \wedge X_3 \wedge X_3 \vee X_1}$	2	$F = \overline{\overline{X_1 \vee X_3} \wedge X_2 \vee X_2 \wedge X_3}$
3	$F = X_1 \vee \overline{X_2 \wedge X_3} \vee X_3 \wedge \overline{X_1}$	4	$F = \overline{\overline{X_1 \wedge X_3} \vee \overline{X_1} \wedge X_2 \vee X_3}$
5	$F = \overline{\overline{X_1 \vee X_3} \wedge X_2 \vee \overline{X_1} \wedge X_3}$	6	$F = \overline{X_2 \wedge X_3 \vee X_1 \vee X_2 \wedge X_3}$
7	$F = \overline{X_1 \vee X_2 \wedge X_3 \vee X_1 \wedge X_3}$	8	$F = \overline{X_1 \wedge X_3 \vee X_1 \vee X_2 \wedge X_3}$

Вариант	Функция	Вариант	Функция
9	$F = \overline{X_1 \vee X_2 \wedge X_3 \wedge X_3 \vee X_1}$	10	$F = \overline{\overline{X_1 \vee X_2 \wedge X_3 \vee X_2 \wedge X_3}}$
11	$F = X_1 \vee \overline{\overline{X_2 \wedge X_3 \vee X_3 \wedge X_1}}$	12	$F = \overline{\overline{X_1 \wedge X_3 \wedge X_1 \vee X_2 \vee X_3}}$
13	$F = \overline{\overline{X_1 \wedge X_3 \wedge X_2 \vee X_1 \wedge X_3}}$	14	$F = \overline{X_2 \wedge X_3 \vee X_1 \vee X_3 \wedge X_3}$
15	$F = \overline{X_1 \vee X_2 \wedge X_3 \vee X_1 \wedge X_2}$	16	$F = \overline{X_1 \wedge X_2 \vee X_1 \vee X_2 \wedge X_3}$
17	$F = \overline{X_1 \vee X_2 \wedge X_3 \wedge X_3 \wedge X_2}$	18	$F = \overline{\overline{\overline{X_2 \vee X_3 \wedge X_1 \vee X_2 \wedge X_3}}}$
19	$F = X_2 \vee \overline{\overline{X_1 \wedge X_3 \vee X_3 \wedge X_1}}$	20	$F = \overline{\overline{X_2 \wedge X_3 \vee X_1 \wedge X_2 \vee X_3}}$
21	$F = \overline{\overline{X_2 \vee X_3 \wedge X_1 \vee X_2 \wedge X_3}}$	22	$F = \overline{X_2 \wedge X_3 \vee X_2 \vee X_1 \wedge X_3}$
23	$F = X_1 \vee \overline{\overline{X_2 \wedge X_3 \vee X_1 \wedge X_3}}$	24	$F = X_1 \vee \overline{X_3 \wedge X_1 \vee X_2 \wedge X_3}$

Решение:

Определяется порядок выполнения операций при реализации заданной логической функции с учетом того, что операция логического умножения имеет приоритет перед операцией логического сложения, т.е. если

исходная функция $F = \overline{\overline{X_1 \wedge X_2 \vee X_3 \wedge X_4 \vee X_1}}$, то

первая операция $F = \overline{F_1 \vee X_3 \wedge X_4 \vee X_1}$, где $F_1 = \overline{X_1 \wedge X_2}$,

вторая операция $F = \overline{F_1 \vee F_2 \vee X_1}$, где $F_2 = \overline{X_3 \wedge X_4}$,

третья операция $F = F_3 \vee X_1$, где $F_3 = \overline{F_1 \vee F_2}$,

четвертая операция $F = F_4$, где $F_4 = F_3 \vee X_1$.

Согласно определенной последовательности выполнения операций, строится устройство на основе логических элементов, реализующих указанные функции (рис. 6.2).

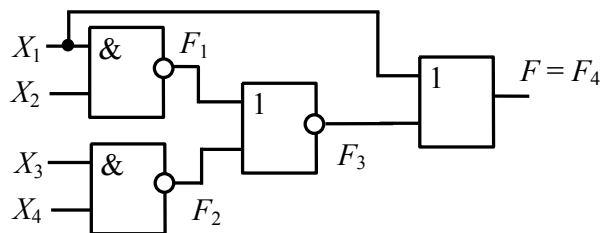
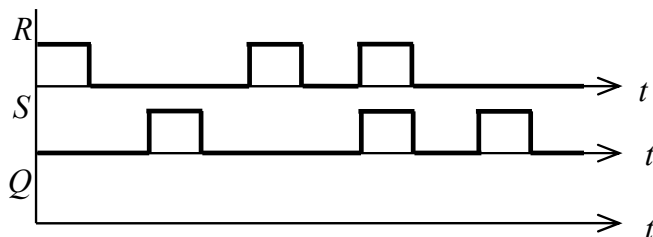
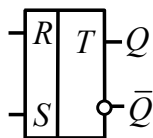


Рис. 6.2

Задача 6.3.

Для представленного триггера вычертите временную диаграмму изменения сигнала на выходе Q .



Решите задачу, используя данные табл. 6.3. Номер варианта выдается преподавателем.

Таблица 6.3

Триггер	Вариант	Временные диаграммы	Вариант	Временные диаграммы
	1		2	
	3		4	
	5		6	
	7		8	
	9		10	

	11		12	
	13		14	
	15		16	
	17		18	
	19		20	
	21		22	
	23		24	

Решение

На временной диаграмме определяются интервалы времени, на которых значения входных сигналов остаются неизменными (рис. 6.3, а).

Определяются значения выходного сигнала триггера на каждом отдельном интервале времени по таблице истинности.

Таблица истинности статического асинхронного RS -триггера имеет вид.

R	S	Q_t	\bar{Q}_t	Режим работы	Интервал времени на временной диаграмме (рис. 6.3, б)
0	0	Q_{t-1}	\bar{Q}_{t-1}	хранение	$(t_1;t_2), (t_3;t_4), (t_5;t_6), (t_7;t_8)$
0	1	1	0	установка	$(t_2;t_3), (t_8;t_9)$
1	0	0	1	сброс	$(0;t_1), (t_4;t_5)$
1	1	*	*	запрещенный	$(t_6;t_7)$

Вычертим временную диаграмму изменения сигнала на выходе Q асинхронного RS -триггера по найденным значениям (рис. 6.3, б).

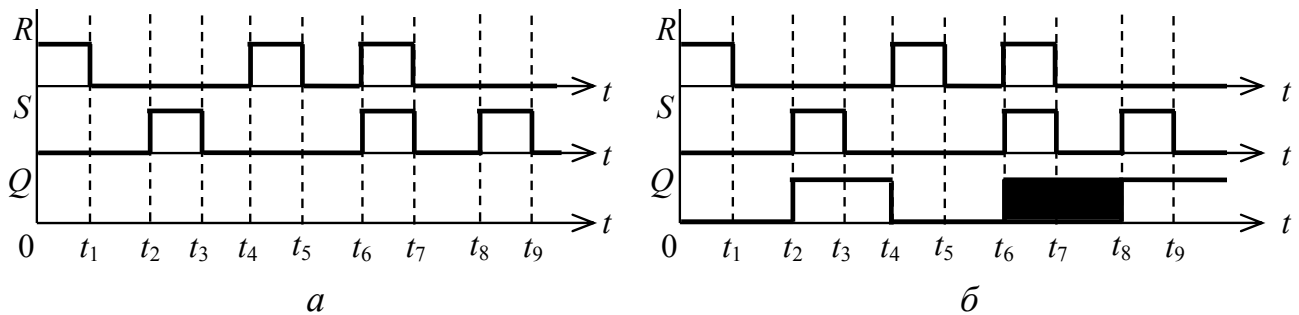


Рис. 6.3

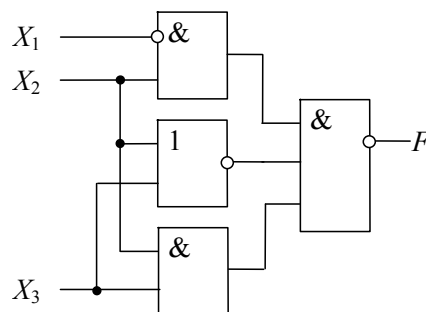
6.3. Задачи для самостоятельного решения

Задача 6.4.

Постройте комбинационное устройство, реализующее функцию

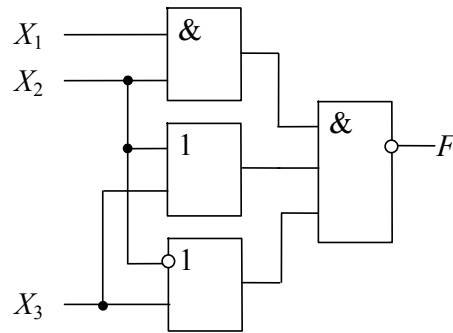
$$F = \overline{(X_1 \wedge X_2)} \wedge X_2 \vee X_3 \wedge (X_2 \wedge X_3).$$

Ответ:



Задача 6.5.

Составьте таблицу истинности комбинационного устройства

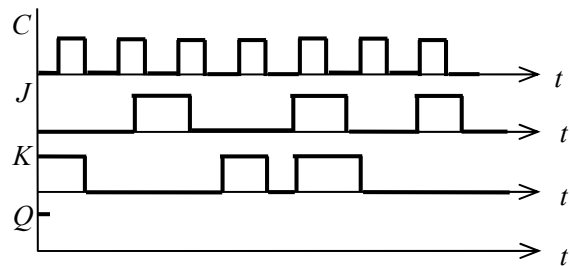
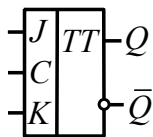


Ответ:

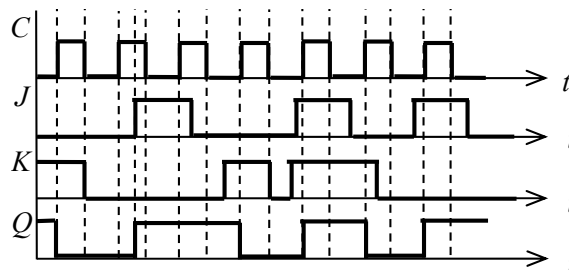
X_1	X_2	X_3	F
0	0	0	1
0	0	1	1
0	1	0	1
0	1	1	1
1	0	0	1
1	0	1	1
1	1	0	1
1	1	1	0

Задача 6.6.

Для заданного триггера вычертите временную диаграмму изменения сигнала на выходе Q .



Ответ:



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Дисциплина «Электротехника и электроника» относится к базовой части профессионального цикла дисциплин, определяющих теоретический уровень подготовки дипломированного выпускника, однако для неэлектротехнических направлений не является профилирующей. Этим, во многом, объясняется отношение студентов к изучению предмета, который оказывается трудным для восприятия.

Сложность изучения заключается в том, что оно основывается на учебном материале ряда общеобразовательных дисциплин, прежде всего математики и физики, а также некоторых разделов материаловедения. Во всех представленных практических занятиях особое внимание уделено физическим процессам, происходящим при работе трансформаторов, электрических машин и устройств современной электроники. При этом применяются современные методы расчета с использованием справочной и другой научно-технической литературы. Подобный подход позволяет выстроить целостную картину обучения со всеми межпредметными и внутренними связями.

С целью более глубокого усвоения изученного материала все занятия снабжены задачами для самостоятельного решения, к которым приведены ответы, что должно привести к получению знаний и умений, необходимых для освоения требуемых компетенций согласно действующим образовательным стандартам.

Желающим получить более глубокие знания рекомендуется обратиться к учебной и учебно-методической литературе, часть из которой приведена в списке литературы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная литература

1. Беневоленский С. Б., Марченко А. Л. Основы электротехники: учебное пособие. М.: Издательство физико-математической литературы, 2006. 568 с.
2. Борисов Ю. М., Липатов Д. Н., Зорин Ю. Н. Электротехника: учебник. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 592 с.
3. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника: учебник. 11-е изд., стер. М.: Академия, 2008. 539 с.
4. Иванов И. И. Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс] : [учебник] / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. Я. Фролов .— 7-е изд., перераб. и доп. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2012 .— 736 с. — (Учебники для вузов, Специальная литература) .— Доступ по логину и паролю из сети Интернет .— ISBN 978-5-8114-1363-8.
5. Белов Н. В. Электротехника и основы электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие / Н. В. Белов, Ю. С. Волков .— 1-е изд. — Санкт-Петербург [и др.] : Лань, 2012 .— 432 с. — (Учебники для вузов, Специальная литература) .— Доступ по логину и паролю из сети Интернет .— ISBN 978-5-8114-1225-9 .
6. Рекус Г. Г. Основы электротехники и электроники в задачах с решениями: учеб. пособие. М.: Высшая школа, 2005. 343 с.

Учебные пособия

1. Электротехника и электроника. Руководство по самостоятельному изучению дисциплины : учебно-методическое пособие / [Вавилова И. В., Чечулина И. Е., Лукманов В. С]. Уфа : УГАТУ, 2018. 122 с.
2. Электротехника и электроника. Часть II. Электромагнитные устройства: учеб. пособие / Р. В. Ахмадеев, И. В. Вавилова, П. А. Грахов, И. Р. Енгальчев, Т. М. Крымская, В. С. Лукманов, О. В. Мельничук, Р. Г. Фаррахов. Уфа: УГАТУ, 2015. 88 с.
3. Электротехника и электроника. Избранные главы аналоговой электроники: учеб. пособие / Р. В. Ахмадеев, И. В. Вавилова, Т. М. Крымская, В. С. Лукманов, О. В. Мельничук. Уфа: УГАТУ, 2017. 93 с.
4. Электротехника и электроника: Часть 2. Электрические машины и электроника. Сборник тестовых заданий: учебное пособие / Р. В. Ахмадеев, И. В. Вавилова, П. А. Грахов, В. С. Лукманов. Уфа: УГАТУ, 2009. 90с