

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
**«Санкт-Петербургский государственный университет
промышленных технологий и дизайна»**
Высшая школа технологии и энергетики
Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники

ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА

Выполнение контрольной работы № 2

Методические указания для студентов всех форм обучения
по направлениям подготовки:

- 13.03.01 — Теплоэнергетика и теплотехника
- 15.03.02 — Технологические машины и оборудование
- 15.03.04 — Автоматизация технологических процессов
и производств
- 18.03.01 — Химическая технология
- 18.03.02 — Энерго- и ресурсосберегающие процессы
в химической технологии, нефтехимии
и биотехнологии
- 27.03.04 — Управление в технических системах
- 29.03.03 — Технология полиграфического
и упаковочного производства

Составители:
В. П. Иваненко
В. Ю. Кузнецов
И. Д. Зятиков

Утверждено
на заседании кафедры АЭиЭ
06.09.2022 г., протокол № 2

Рецензент Н. С. Благодарный

Методические указания соответствуют программам и учебным планам дисциплин «Электротехника и промышленная электроника», «Электротехника и промышленная электроника в области охраны окружающей среды» и «Электротехника и электроника» для студентов, обучающихся по направлениям подготовки: 13.03.01 – Теплоэнергетика и теплотехника, профиль «Промышленная теплоэнергетика», 15.03.02 – Технологические машины и оборудование, профиль «Машины и аппараты комплексной переработки возобновляемых ресурсов», 15.03.04 – Автоматизация технологических процессов и производств, профиль «Автоматизация технологических процессов и производств», 18.03.01 – Химическая технология, профиль «Химическая и биотехнология переработки растительного сырья», 18.03.02 – Энерго- и ресурсосберегающие процессы в химической технологии, нефтехимии и биотехнологии, профиль «Охрана окружающей среды и рациональное использование природных ресурсов», 27.03.04 – Управление в технических системах, профиль «Системы и средства автоматизации технологических процессов», 29.03.03 – Технология полиграфического и упаковочного производства, профиль «Технология упаковочного производства».

Методические указания содержат краткие теоретические сведения, задания и рекомендации по выполнению контрольной работы по темам: «Трансформаторы» и «Асинхронные электродвигатели».

Методические указания предназначены для бакалавров всех форм обучения.

Утверждено Редакционно-издательским советом ВШТЭ СПбГУПТД в качестве
методических указаний

Редактор и корректор А. А. Чернышева
Техн. редактор Д. А. Романова

Темплан 2022 г., поз. 5044/22

Подписано к печати 03.11.22.	Формат 60x84/16.	Бумага тип № 1.
Печать офсетная.	Печ.л. 1,5.	Уч.-изд. л. 1,5.
Тираж 30 экз. (1 завод)	Изд. № 5044/22.	Цена «С». Заказ №

Ризограф Высшей школы технологии и энергетики СПбГУПТД,
198095, Санкт-Петербург, ул. Ивана Черных, 4.

© ВШТЭ СПбГУПТД, 2022

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ	4
1. ТЕМА 3 «ТРАНСФОРМАТОРЫ».....	5
1.1. Теоретические сведения	5
1.2. Задания для контрольной работы	10
1.3. Методические указания к выполнению задания.....	11
2. ТЕМА 4 «АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ»	11
2.1. Теоретические сведения	11
2.2. Задания для контрольной работы	19
2.3. Методические указания к выполнению задания.....	20
3. ВОПРОСЫ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ПО ТЕМАМ 3 И 4	21
4. УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА	22
ПРИЛОЖЕНИЕ	24

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания предназначены для выполнения контрольной работы по дисциплине «Электротехника и электроника» студентами 2 и 3 курсов очной и заочной форм обучения СПбГУПТД.

Контрольная работа включает в себя задания по Теме 3 «Трансформаторы» и Теме 4 «Асинхронные электродвигатели». Выполнение указанных заданий способствует более глубокому усвоению теории, позволяет сконцентрировать внимание обучающихся на ее узловых положениях.

В методических указаниях каждая тема содержит в себе теоретическую часть, необходимую для решения задач и помогающая студенту закрепить теоретические положения курса. В практической части приведены задания по темам и указания к их решению.

ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КОНТРОЛЬНОЙ РАБОТЫ

Контрольная работа – это один из видов проверки знаний студента, который показывает, на каком уровне он владеет материалом по научной дисциплине, а также может объяснять и использовать полученные знания.

Контрольная работа оформляется в соответствии с государственными стандартами.

Контрольная работа состоит из следующих частей:

- титульный лист;
- задание;
- содержание;
- основная часть работы;
- заключение;
- список литературы.

На титульном листе указываются: название учебного заведения; тема работы; ФИО студента и проверяющего; год и место выполнения. Пример выполнения титульного листа показан в Приложении 1.

Содержание работы помещают после титульного листа и задания контрольной работы. В содержании указывается перечень всех разделов работы.

Контрольная оформляется *с использованием компьютера* на одной стороне листа бумаги формата А4 через 1,5 интервала. Цвет шрифта – черный, шрифт – Times New Roman, размер 14.

Текст контрольной работы следует печатать, соблюдая следующие размеры полей: левое – 30 мм, правое – 10 мм, нижнее – 20 мм, верхнее – 20 мм. Основной текст работы выравнивается «по ширине». Отступ абзаца – 1,25 мм от левой границы текста.

Написание формул осуществляется только с помощью редактора формул (встроенное средство MS Word).

Иллюстрации могут быть в компьютерном исполнении, в том числе и цветные. На все иллюстрации должны быть даны ссылки в работе. Иллюстрации следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Если иллюстрация в работе одна, то она все равно обозначается с присвоением ей номера, например, рисунок 1. В конце наименования иллюстрации точку не ставят (пример, рисунок 6).

Все страницы работы нумеруются арабскими цифрами, соблюдая сквозную нумерацию по всему тексту, включая приложения. Номер страницы проставляется по середине нижнего поля листа. Титульный лист включается в общую нумерацию страниц, но номер на первой странице на нем не проставляется.

Список литературы является составной частью работы и отражает степень изученности рассматриваемой проблемы. При этом в список литературы включаются, как правило, не только те источники, на которые в работе имеются библиографические ссылки, но и те, которые изучены при исследовании темы работы.

1. ТЕМА 3 «ТРАНСФОРМАТОРЫ»

1.1. Теоретические сведения

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две или большее число индуктивно связанных обмоток и предназначенное для преобразования посредством электромагнитной индукции одной системы переменного тока в другую. Основное назначение трансформаторов – изменять напряжение переменного тока. Однако они могут применяться также для преобразования числа фаз и частоты.

Трансформатор характеризуется номинальными данными, которые указаны на его заводском щитке.

Номинальная мощность трансформатора S_n – полная мощность на зажимах вторичной обмотки, указываемая на щитке и выраженная в вольт-амперах (ВА) или киловольт-амперах (кВА).

Номинальное первичное напряжение $U_{1н}$ – напряжение сети, на которое рассчитан трансформатор.

Номинальное вторичное напряжение $U_{2н}$ – напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе и номинальном первичном напряжении.

Номинальные токи обмоток – первичный $I_{1н}$ и вторичный $I_{2н}$ – токи, соответствующие номинальным значениям напряжений и мощности. Так как КПД трансформаторов сравнительно высок, то принимают, что у двухобмоточного трансформатора номинальные мощности обеих обмоток равны. Для трехфазных трансформаторов в качестве номинальных значений напряжений и токов указывают линейные величины.

Магнитный поток Φ , создаваемый реактивной составляющей тока первичной обмотки и сцепленный со всеми витками обеих обмоток, при своем изменении наводит в них ЭДС, действующие значения которых: $E_1 = 4,44fw_1\Phi_m$, и $E_2 = 4,44fw_2\Phi_m$, где f – частота тока в сети; w_1 и w_2 – числа витков обмоток; Φ_m – амплитудное значение основного магнитного потока в сердечнике.

Для понижающего трансформатора отношение ЭДС первичной обмотки к ЭДС вторичной есть коэффициент трансформации трансформатора:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} \approx \frac{U_{1H}}{U_{2H}}. \quad (1.1)$$

В общем случае числа витков $w_1 \neq w_2$, поэтому $E_1 \neq E_2$, $I_1 \neq I_2$ и, как следствие, различны активные r_1, r_2 и реактивные x_1, x_2 сопротивления обмоток. Это затрудняет количественный анализ процессов, происходящих в трансформаторе.

Чтобы избежать этих затруднений, реальный трансформатор, имеющий различные числа витков первичной w_1 и вторичной w_2 обмоток, заменяется эквивалентным (приведенным) трансформатором, у которого $w_2 = w_1$ и $k = 1$. Приведенные параметры вторичной обмотки обозначаются со штрихами.

Из условий, что все энергетические и электромагнитные соотношения в реальном и приведенном трансформаторах одинаковы, находим:

$$\begin{aligned} E_2' &= kE_2, \quad I_2' = \frac{I_2}{k}, \quad U_2' = kU_2, \\ r_2' &= k^2r_2, \quad x_2' = k^2x_2, \quad z_2' = k^2z_2, \\ Z_H' &= k^2Z_H. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Исследование работы трансформатора упрощается, если электромагнитную связь между обмотками заменить цепью, элементы которой связаны между собой только электрически. В теории трансформаторов используют Т-образную схему замещения для приведенного трансформатора (рис. 1.1).

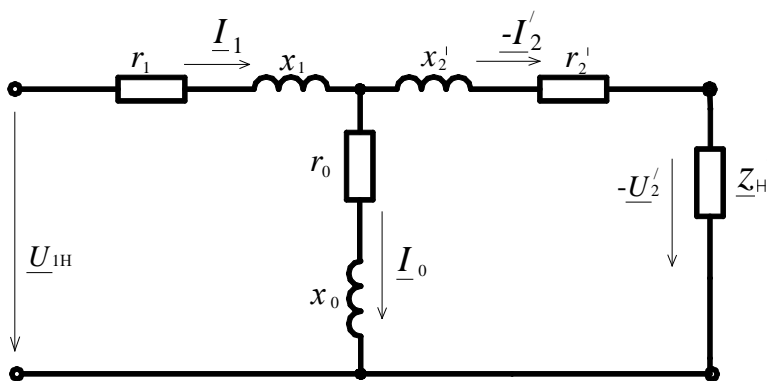


Рис. 1.1. Т-образная схема замещения трансформатора

На схеме замещения с помощью параметров r_1, x_1, r_2', x_2' учитываются сопротивления обмоток приведенного трансформатора, а с помощью r_0, x_0 – параметры намагничивающего контура, причем:

$$r_1 = r_2' \ll r_0 \quad \text{и} \quad x_1 = x_2' \ll x_0. \quad (1.3)$$

В зависимости от величины сопротивления нагрузки трансформатор может работать в трех режимах:

1. Холостой ход при сопротивлении нагрузки $z_H = \infty$;
2. Короткое замыкание при $z_H = 0$;
3. Нагрузочный режим при $0 < z_H < \infty$.

Имея параметры схемы замещения, можно анализировать любой режим работы трансформатора. Сами параметры определяются на основе опытов холостого хода и короткого замыкания.

Для однофазного трансформатора на основе данных опыта холостого хода имеем:

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \quad z_0 = \frac{U_{1H}}{I_0}, \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \quad (1.4)$$

а из опыта короткого замыкания:

$$r_k = r_1 + r_2' = \frac{P_{KH}}{I_{1H}^2}, \quad z_k = \frac{U_{KH}}{I_{1H}}, \quad x_k = x_1 + x_2' = \sqrt{z_k^2 - r_k^2},$$

$$r_1 = r_2' = \frac{r_k}{2},$$

$$x_1 = x_2' = \frac{x_k}{2}, \quad (1.5)$$

где P_0, I_0 – активная мощность и ток, потребляемые трансформатором из сети в опыте холостого хода;

P_{KH} – активная мощность, потребляемая из сети в опыте короткого замыкания;

U_{KH} – напряжение короткого замыкания трансформатора, при котором $I_{1K} = I_{1H}$.

При работе в нагрузочном режиме очень важно знать, как влияют параметры нагрузки на КПД и изменение напряжения на зажимах вторичной обмотки.

КПД трансформатора равен:

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + \beta^2 P_{KH} + P_0}, \quad (1.6)$$

где S_H – полная номинальная мощность трансформатора; φ_2 – угол сдвига фаз между током и напряжением в нагрузке; β – коэффициент нагрузки, равный отношению реального тока вторичной обмотки к его номинальному значению, $\beta = I/I_{2H}$.

Зависимость $\eta = f(\beta)$ имеет максимум, который достигается при $P_K = P_0$, где P_K – мощность потерь в обмотках при реальных значениях токов в них,

$$P_K = \beta^2 P_{\text{опт}} P_{\text{кн}}.$$

График $\eta = f(\beta)$ имеет вид рис. 1.2.

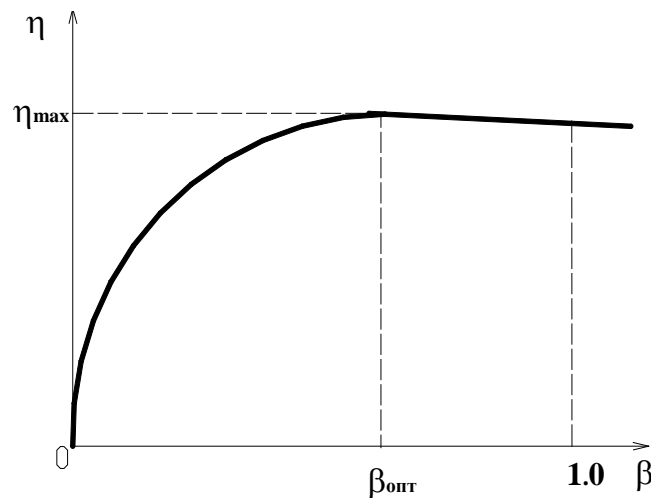


Рис. 1.2. Кривая изменения КПД трансформатора в зависимости от коэффициента нагрузки

Для определения процентного изменения напряжения на вторичной обмотке трансформатора используется уравнение:

$$\Delta u \% = \beta \left(\frac{I_{1H} r_k \cos \varphi_2}{U_{1H}} + \frac{I_{1H} x_k \sin \varphi_2}{U_{1H}} \right) 100 \% = \beta (u_{ka} \cos \varphi_2 + u_{kp} \sin \varphi_2), \quad (1.7)$$

где $u_{ka} = \frac{I_{1H} r_k}{U_{1H}} 100\%$, $u_{kp} = \frac{I_{1H} x_k}{U_{1H}} 100\%$.

Внешней характеристикой трансформатора является зависимость $U_2 = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$, $\cos \varphi_2 = \text{const}$ (рис. 1.3).

Для построения внешней характеристики можно использовать выражение:

$$U_2 = \frac{U_{1H}}{k} \left(1 - \frac{\Delta u \%}{100} \right). \quad (1.8)$$

При активно-емкостной нагрузке и определенном соотношении $r_{\text{н}}$ и $x_{\text{сн}}$ может быть получено постоянство U_2 при росте I_2 . Отмеченное достигается, когда угол φ_2 имеет определенную величину и является отрицательным.

В цепях трехфазного тока трансформирование электрической энергии осуществляется с помощью трехфазных трансформаторов. При этом принято начала фаз обмотки высшего напряжения обозначать A, B, C , а их концы – X, Y, Z ; начала фаз обмотки низшего напряжения соответственно – a, b, c , а концы – x, y, z .

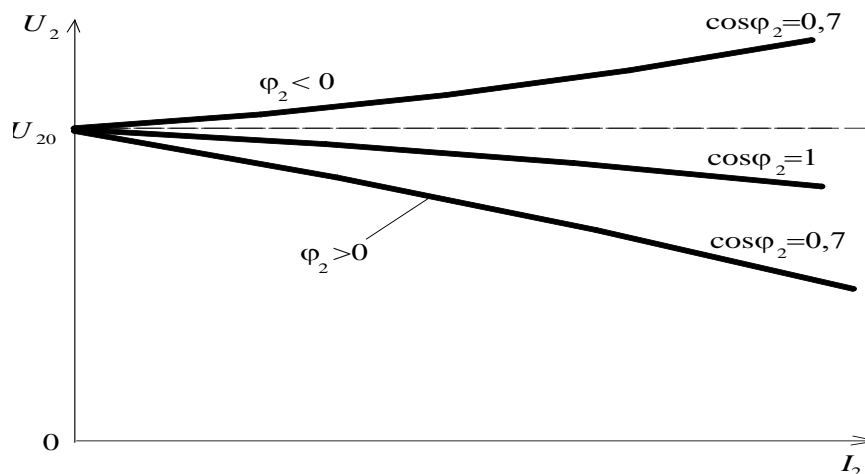


Рис. 1.3. Внешние характеристики трансформаторов средней и большой мощности

Как первичные, так и вторичные обмотки трансформаторов могут соединяться звездой (символ Υ , а при выведенной нейтральной точке – Υ°) или треугольником (символ Δ). Обычно применяются группы соединения Υ/Υ° , Υ/Δ , Υ°/Δ , которые являются основными. Символ способа соединения обмотки высшего напряжения принято указывать в числителе.

Трехфазные трансформаторы характеризуются коэффициентами трансформации:

а) фазным – отношением числа витков $w_{\text{вн}}$ фазы обмотки высшего напряжения (ВН) к числу витков $w_{\text{нн}}$ фазы обмотки низшего напряжения (НН),

$$k_{\text{ф}} = w_{\text{вн}}/w_{\text{нн}} = U_{\text{фвн}}/U_{\text{фнн}}; \quad (1.9)$$

б) линейным – отношением линейного напряжения обмотки ВН к линейному напряжению обмотки НН в режиме холостого хода

$$k_{\text{л}} = U_{\text{лвн}}/U_{\text{лнн}}. \quad (1.10)$$

1.2. Задания для контрольной работы

Расчет однофазного трансформатора

Исходные данные:

Однофазный трансформатор малой мощности характеризуется следующими номинальными величинами: мощность S_n , первичное напряжение $U_{1н}$, вторичное напряжение $U_{2н}$, процентное значение тока холостого хода i_0 %, мощность потерь в сердечнике трансформатора P_0 , процентное значение напряжения короткого замыкания u_k %, мощность потерь короткого замыкания $P_{кн}$.

Определить:

1. Коэффициент трансформации трансформатора k , номинальные токи первичной $I_{1н}$ и вторичной $I_{2н}$ обмоток.
2. Параметры Т-образной схемы замещения, КПД при коэффициенте нагрузки $\beta = (0,25;0,5;0,75;1)$ и коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0.8$.
3. Процентное изменение вторичного напряжения Δu % и вторичное напряжение U_2 при $\beta = (0,25;0,5;0,75;1)$ и $\cos\varphi_2 = 0.8$.
4. Характер нагрузки, при котором вторичное напряжение не зависит от коэффициента β .
5. Коэффициенты мощности для режимов холостого хода и короткого замыкания – $\cos\varphi_0$, $\cos\varphi_k$.
6. Начертить схему замещения трансформатора, построить зависимость $U_2 = f(\beta)$ при $\cos\varphi_2 = 0.8$.

Числовые значения исходных величин берутся студентом из табл. 1 по последней цифре номера зачетной книжки. Ноль соответствует 10 варианту.

Таблица 1 – Исходные данные к заданию по теме 3

Вариант	Тип трансформатора	S_n , ВА	$U_{1н}$, В	$U_{2н}$, В	i_0 , %	P_0 , Вт	u_k , %	$P_{кн}$, Вт
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	ПОБС-5АУЗ	300	220	44	14	18	11	20
2	ПРТ-АУЗ	65	220	12	4,4	3	15	5
3	ПТ-25АУЗ	65	220	60	4,4	3	14	4
4	ПТИУЗ	80	220	11,2	27	4,5	13	4
5	СОБСЗА	50	110	82,6	8	3	12	3
6	СТ-3	13	110	13	53	1	25	2
7	СТ-2	25	165	13	27	2	18	2
8	СТ-3	13	220	13	42	1,5	17	1,5
9	СКТ-1	12	220	165	50	3	17	1
10	СТ-2	25	165	13	29	1	15	2

1.3. Методические указания к выполнению задания

Параметрами Т-образной схемы замещения являются сопротивления $r_1, x_1, r_2', x_2', r_0$ и x_0 . Данные сопротивления определяются из следующих уравнений:

$$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}, \text{ где } I_0 = \frac{i_0\%}{100} I_{1H};$$

$$r_1 = r_2' = r_k/2, \text{ где } r_k = \frac{P_{KH}}{I_{1H}^2};$$

$$x_1 = x_2' = x_k/2, \text{ где } x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2};$$

$$z_k = U_{KH}/I_{1H},$$

$$U_{KH} = \frac{u_k\%}{100} U_{1H};$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}, \text{ где } z_0 = U_{1H}/I_0.$$

Коэффициенты мощности для режимов:

- холостого хода $\cos\varphi_0 = r_0/z_0$ или $\cos\varphi_0 = P_0/(U_{1H}I_0)$;
- короткого замыкания $\cos\varphi_K = r_k/z_k$ или $\cos\varphi_K = P_{KH}/(U_{KH}I_{1H})$.

Зависимость $U_2 = f(\beta)$ строится на основании данных расчета по пункту 3 задания.

Вопросы теории по решению остальных пунктов задания отражены в разделе 1.1.

2. ТЕМА 4 «АСИНХРОННЫЕ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ»

2.1. Теоретические сведения

2.1.1. Принцип действия асинхронного двигателя

Асинхронная машина – это машина переменного тока, у которой частота вращения ротора отличается от частоты вращения магнитного поля статора.

В большинстве случаев асинхронная машина используется как двигатель. Наиболее широкое распространение нашли трехфазные асинхронные двигатели,

двигатели с однофазной обмоткой, как правило, выполняются небольшой мощности (примерно до 0,5 кВт).

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из двух частей: неподвижной – статора и вращающейся – ротора.

Статор трехфазного двигателя представляет собой полый цилиндр, набранный из листов электротехнической стали, на внутренней поверхности которого имеются пазы. Внутри пазов укладывается обмотка, которая может соединяться звездой или треугольником. Она состоит из отдельных катушек (секций), которые объединены в три фазы. В двухполюсных машинах фазы на статоре располагаются со сдвигом в пространстве под углом в 120° .

Внутри статора находится ротор, в пазах которого также размещается обмотка. В зависимости от исполнения этой обмотки асинхронные двигатели делятся на двигатели с фазным и короткозамкнутым ротором. На практике наибольшее распространение имеют последние, в них обмотка ротора выполняется в виде «беличьей клетки».

При питании обмотки статора трехфазным током создается вращающееся магнитное поле (поток Φ), частота вращения которого (синхронная):

$$n_1 = 60f_1/p, \quad (2.1)$$

где f_1 – частота тока сети; p – число пар полюсов статорной обмотки.

Вращающееся поле статора индуцирует в проводниках ротора ЭДС (направление ЭДС определяется по правилу правой руки), и по ним протекает ток. Активная составляющая этого тока совпадает по фазе с ЭДС. В результате взаимодействия отмеченного тока с потоком статора создается электромагнитная сила (ее направление определяется по правилу левой руки) и электромагнитный момент M , под действием которого ротор приходит во вращение с частотой n в ту же сторону, что и поток Φ . Относительную разность частот вращения статорного магнитного поля и ротора обозначают через s и называют скольжением,

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}, \quad (2.2)$$

последнее часто выражают в процентах:

$$s_{\%} = \frac{n_1 - n}{n_1} 100\%. \quad (2.3)$$

2.1.2. Асинхронный двигатель при неподвижном роторе

Электромагнитные процессы в асинхронном двигателе с заторможенным ротором аналогичны процессам, происходящим в трансформаторе. Если к обмотке статора подвести напряжение сети U_1 , а обмотку ротора разомкнуть (например, в двигателе с фазным ротором с помощью подъема щеток), то

вращающееся поле статора, пересекая обмотки статора и ротора, индуцирует в них фазные ЭДС E_1 и E_2 :

$$E_1 = 4,44f_1w_1k_{o\delta 1}\Phi_m; \quad (2.4)$$

$$E_2 = 4,44f_1w_2k_{o\delta 2}\Phi_m, \quad (2.5)$$

где f_1 – частота тока сети;

w_1, w_2 – числа витков фазных обмоток статора и ротора;

$k_{o\delta 1}, k_{o\delta 2}$ – обмоточные коэффициенты соответствующих обмоток;

Φ_m – амплитудное значение основного магнитного потока.

Рассмотренный режим аналогичен режиму холостого хода трансформатора. Однако, относительное значение тока холостого хода у асинхронного двигателя больше, чем у трансформатора из-за двойного воздушного зазора между статором и ротором, который увеличивает магнитные потоки рассеяния. На основании второго закона Кирхгофа для одной фазы статорной обмотки можно записать следующее уравнение:

$$\underline{U}_1 = -\underline{E}_1 + j\underline{I}_0x_1 + \underline{I}_0r_1, \quad (2.6)$$

где U_1 – фазное напряжение источника питания;

E_1 – фазная ЭДС статорной обмотки;

I_0 – ток холостого хода;

x_1 – индуктивное сопротивление рассеяния фазной обмотки статора;

r_1 – активное сопротивление этой обмотки.

Коэффициент трансформации ЭДС асинхронного двигателя:

$$k_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{k_{o\delta 1}w_1}{k_{o\delta 2}w_2}. \quad (2.7)$$

Если роторную обмотку двигателя замкнуть, а сам ротор затормозить, то двигатель будет работать в режиме короткого замыкания. Относительное значение напряжения короткого замыкания, при котором $I_{1к} = I_{1н}$ у двигателя больше, чем у трансформатора из-за больших магнитных потоков рассеяния.

Физическая сущность явлений при коротком замыкании асинхронного двигателя та же, что и в трансформаторе. Если пренебречь для режима короткого замыкания МДС, создающей основной магнитный поток, то можно записать

$$\underline{F}_1 = -\underline{F}_2, \quad (2.8)$$

где F_1 и F_2 – намагничивающие силы статорной и роторной обмоток.

$$\underline{F}_1 = 0,9m_1w_1k_{o\delta 1}\underline{I}_1, \quad (2.9)$$

$$\underline{F}_2 = 0,9m_2w_2k_{o\delta 2}\underline{I}_2, \quad (2.10)$$

где m_1 и m_2 – числа фаз соответствующих обмоток.

Из равенства МДС F_1 и F_2 можно определить коэффициент трансформации токов при $m_1 = m_2$,

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} = \frac{w_1 k_{\sigma\delta 1}}{w_2 k_{\sigma\delta 2}}.$$

По аналогии с трансформатором обмотку ротора приводят к числу фаз и числу витков обмотки статора. Для приведенной асинхронной машины имеем следующие параметры:

$$\begin{aligned} E_2' &= E_1 = E_2 k_E; \\ I_1 &= I_2' = I_2 / k_i; \\ r_2' &= r_2 k_E k_i; \\ x_2' &= x_2 k_E k_i; \\ r_k &= r_1 + r_2'; \\ x_k &= x_1 + x_2'. \end{aligned} \quad (2.11)$$

2.1.3. Работа асинхронной машины при вращающемся роторе

В статорной обмотке при переходе от неподвижного ротора к подвижному практически ничего не меняется. В роторной же обмотке изменяется частота ЭДС из-за возникновения скольжения,

$$f_{2s} = f_1 s. \quad (2.12)$$

Для ЭДС и индуктивного сопротивления обмотки ротора можно записать:

$$E_{2s} = 4,44 f_{2s} w_2 k_{\sigma\delta 2} \Phi_m = 4,44 f_1 s w_2 k_{\sigma\delta 2} \Phi_m = E_2 s; \quad (2.13a)$$

$$x_{2s} = 2\pi f_{2s} L_{2\sigma} = 2\pi f_1 s L_{2\sigma} = x_2 s, \quad (2.13b)$$

где $L_{2\sigma}$ – индуктивность рассеяния фазной обмотки ротора.

Активное сопротивление при малой частоте тока в роторной обмотке можно считать неизменным, т. е. $r_2 = r_2' = \text{const}$, тогда по закону Ома ток в роторной обмотке:

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} = \frac{E_2 s}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 s)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{\left(\frac{r_2}{s}\right)^2 + x_2^2}} \quad (2.14)$$

Последнее выражение для тока позволяет режим двигателя с вращающимся ротором привести к эквивалентному режиму при неподвижном роторе. В этом режиме во вторичной цепи вместо ЭДС при вращении ротора E_{2s}

с частотой f_{2s} будет существовать ЭДС при неподвижном роторе E_2 с частотой f_1 , а вместо индуктивного сопротивления при вращении ротора x_{2s} во вторичной цепи действует индуктивное сопротивление при неподвижном роторе x_2 . Для сохранения величины и фазы тока I_2 необходимо вместо r_2 , действующего при вращении, ввести новое сопротивление r_2/s . Представим r_2/s как:

$$r_2/s = r_2 + r_2(1-s)/s. \quad (2.15)$$

Тогда эквивалентная схема роторной цепи имеет вид рис. 2.1, а схема замещения для приведенной машины изображена на рис. 2.2.

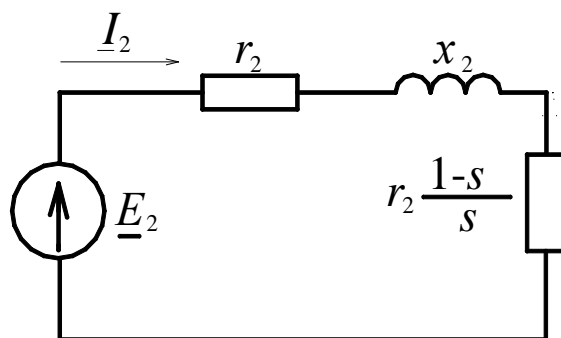


Рис. 2.1. Эквивалентная схема роторной цепи

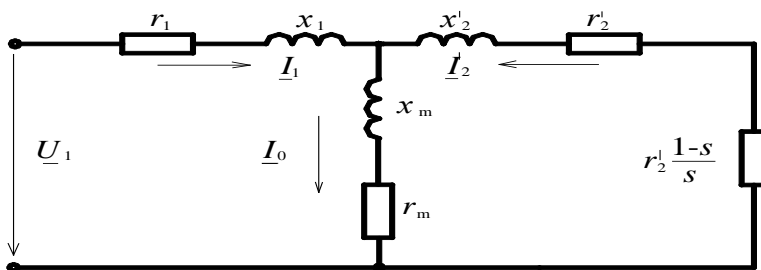


Рис. 2.2. Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

В приведенной Т-образной схеме замещения скольжение оказывает влияние на все три тока цепи, что затрудняет анализ процессов в двигателе. Поэтому часто применяют Г-образную схему с вынесенной на входные зажимы намагничивающей ветвью (рис. 2.3):

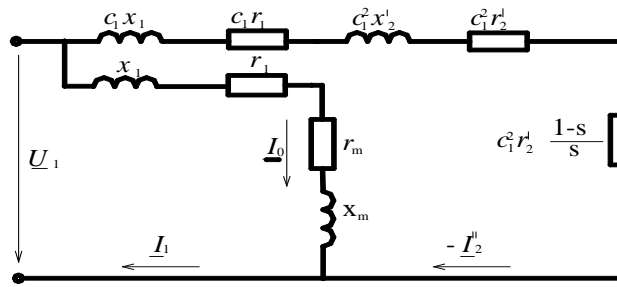


Рис. 2.3. Г-образная схема замещения асинхронной машины

В данной схеме с помощью поправочного коэффициента c_1 компенсируется некоторая погрешность, возникающая при вынесении намагничивающей ветви на входные зажимы. Этот коэффициент можно определить по формуле:

$$c_1 = 1 + \frac{x_1}{x_m}. \quad (2.16)$$

На схемах замещения r_1 и x_1 – фазное активное и индуктивное сопротивление статорной обмотки, r_2' и x_2' – аналогичные приведенные сопротивления роторной обмотки, r_m и x_m – параметры намагничивающей ветви, $r_2' \frac{1-s}{s}$ и $c_1^2 r_2' \frac{1-s}{s}$ – элементы, на которых выделяется электрическая мощность, равная механической мощности на валу двигателя.

2.1.4. Вращающий момент асинхронного двигателя

Согласно схеме замещения (рис. 2.3) уравнение электромагнитной мощности имеет вид:

$$P_{\text{ЭМ}} = m I_2'^2 c_1^2 \left(r_2' + r_2' \frac{1-s}{s} \right) = m I_2'^2 c_1^2 \frac{r_2'}{s}.$$

Приведенное значение тока роторной обмотки:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left(c_1 r_1 + \frac{c_1^2 r_2'}{s} \right)^2 + \left(c_1 x_1 + c_1^2 x_2' \right)^2}} \quad (2.17)$$

Электромагнитный момент:

$$M = \frac{P_{\text{ЭМ}}}{\omega_1} = \frac{m U_1 \frac{c_1^2 r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(c_1 r_1 + \frac{c_1^2 r_2'}{s} \right)^2 + \left(c_1 x_1 + c_1^2 x_2' \right)^2 \right]}, \quad (2.18)$$

где m – число фаз статора; $\omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p}$.

При анализе электромагнитных процессов в машинах общего применения очень часто полагают $s_1 \approx 1$, что существенно облегчает расчеты и мало сказывается на точности полученных результатов. Г-образную схему замещения при $s_1 \approx 1$ называют упрощенной. Для данной схемы электромагнитный момент:

$$M = \frac{mU_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 [(r_1 + \frac{r_2'}{s})^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (2.19)$$

В соответствии с этим выражением зависимость $M = f(s)$, называемая механической характеристикой, имеет вид рис. 2.4.

На рисунке максимальный (критический) момент, развиваемый при критическом скольжении $s_{кр}$, при некоторых допущениях равен:

$$M_{\max} = M_{кр} = \pm \frac{1}{2} \frac{m_1 U_1^2}{\omega_1 (x_1 + x_2')} , \quad (2.20)$$

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{x_k} . \quad (2.21)$$

При пуске, когда $s = +1$, двигатель развивает пусковой момент $M_{п}$. В номинальном режиме при s_n двигатель имеет номинальный момент M_n .

Для расчета механической характеристики можно использовать упрощенную формулу Клосса:

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} , \quad (2.22)$$

где s – скольжение, при котором определяется момент M .

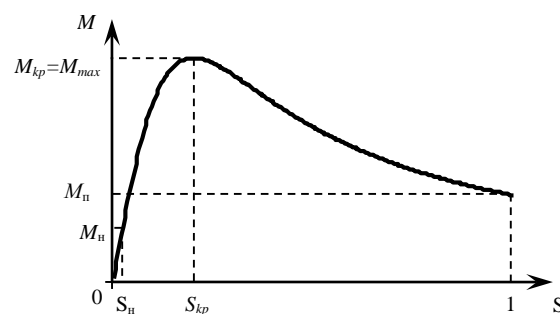


Рис. 2.4. Зависимость $M = f(s)$ для асинхронного двигателя

Формула Клосса вместе с выражением для определения частоты вращения ротора $n = n_1(1-s)$ позволяет получить механическую характеристику в виде зависимости $n = f(M)$ (рис. 2.5).

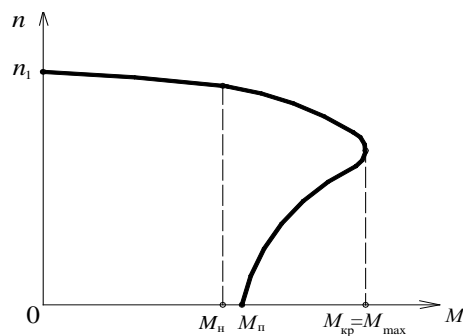


Рис. 2.5. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Более точные кривые $M = f(s)$ и $n = f(M)$ можно получить, если воспользоваться уточненной формулой Клосса:

$$M = \frac{(2 + as_{KP})M_{KP}}{\frac{s}{s_{KP}} + \frac{s_{KP}}{s} + as_{KP}}, \quad (2.23)$$

где $a = \frac{2r_1}{c_1 r_2'}$;

$c_1 = 1 + x_1/x_m$;

$$s_{KP} = \frac{c_1 r_2'}{x_1 + c_1 x_2'}. \quad (2.24)$$

В расчете можно принять $a = 2$ [5].

Рабочими характеристиками асинхронного двигателя называют зависимости потребляемой мощности P_1 , первичного тока I_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$, момента на валу M_2 , скольжения s и КПД η от полезной мощности P_2 при работе с номинальными напряжением и частотой.

Вид отмеченных характеристик представлен на рис. 2.6.

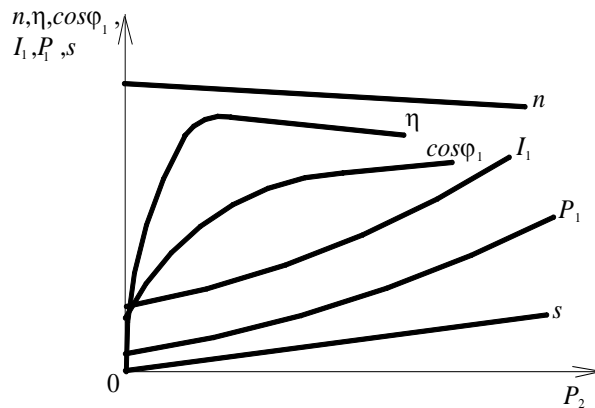


Рис. 2.6. Рабочие характеристики асинхронного двигателя

2.2. Задания для контрольной работы

Расчет характеристик асинхронного электродвигателя

Исходные данные:

Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором характеризуется следующими номинальными величинами: мощность P_H , линейное напряжение U_H , частота вращения ротора n_H , коэффициент полезного действия η_H , коэффициент мощности $\cos\varphi_H$, кратность пускового тока $I_{1П}/I_{1Н}$, кратность максимального момента M_{\max}/M_H .

Определить:

1. Активную мощность, потребляемую двигателем из сети $P_{1Н}$; номинальный M_H и критический $M_{КР}$ моменты ($M_{КР} = M_{\max}$); номинальный $I_{1Н}$ и пусковой $I_{1П}$ токи.
2. Число пар полюсов статорной обмотки p , частоту вращения магнитного поля статора n_1 , номинальное s_H и критическое $s_{КР}$ скольжения.
3. Зависимость электромагнитного момента от скольжения $M = f(s)$. Построить графики $M = f(s)$ и $n = f(M)$.
4. Значения пускового и критического моментов при уменьшении питающего напряжения на 15 %. Указать, можно ли запустить двигатель под нагрузкой $M_C = M_H$ при снижении напряжения на 15 %

Числовые значения исходных величин берутся студентом из табл. 2 по последней цифре номера зачетной книжки. Ноль соответствует 10 варианту.

Таблица 2 – Исходные данные к заданию по теме 4

Вариант	Тип	P_H , кВт	U_H , В	n_H , об/мин	η_H , %	$\cos\varphi_H$	$I_{1П}/I_{1Н}$	M_{max}/M_H
1	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4А50А4	0,06	380	1380	50	0,6	2,5	2,2
2	4А50В4	0,09	380	1370	55	0,6	2,5	2,2
3	4А56А4	0,12	380	1375	63	0,66	3,5	2,2
4	4А56В4	0,18	380	1365	64	0,64	3,5	2,2
5	4А63А4	0,25	380	1380	68	0,65	4	2,2
6	4А63В4	0,37	380	1365	68	0,69	4	2,2
7	4А71А4	0,55	380	1390	70,5	0,7	4,5	2,2
8	4А71В4	0,75	380	1390	72	0,73	4,5	2,2
9	4А80А4	1,1	380	1420	75	0,81	5	2,2
10	4А80В4	1,5	380	1415	77	0,83	5	2,2

2.3. Методические указания к выполнению задания

Активная мощность, потребляемая двигателем из сети при номинальной нагрузке, $P_{1Н} = P_H/\eta_H$.

Указанная мощность $P_{1Н} = \sqrt{3} U_{1Н} I_{1Н} \cos\varphi_H$. Из данного уравнения можно определить $I_{1Н}$, а имея кратность пускового тока – рассчитать саму величину пускового тока $I_{1П}$.

Номинальный момент на валу двигателя $M_H = 9,55 P_H/n_H$, а критический (максимальный) $M_{кр} = k_M M_H$, где k_M – кратность максимального момента, $k_M = M_{кр}/M_H$.

По заданию имеем номинальную частоту вращения двигателя n_H ,

$$n_H = n_1(1-s_H).$$

Величина n_H в двигательном режиме работы асинхронной машины всегда несколько меньше частоты вращения магнитного поля статора n_1 . Последняя зависит от числа пар полюсов статорной обмотки p .

При $p = 1$ $n_1 = 60f/p = 60 \cdot 50/1 = 3000$ об/мин; $p = 2$ $n_1 = 1500$ об/мин; $p = 3$ $n_1 = 1000$ об/мин и т.д.

Если, например, по заданию $n_H = 1415$ об/мин, то ближайшее большее значение $n_1 = 1500$ об/мин и $p = 2$.

Зная n_1 и n_H , можно определить номинальное скольжение s_H . Тогда, используя упрощенную формулу Клосса (2.22), из условия номинального режима работы можно определить критическое скольжение $s_{кр}$.

Зависимость момента от скольжения $M = f(s)$ определяется по той же формуле (2.22). Для этого задаются рядом значений скольжения s (0,005; s_H ; 0,1;

$s_{кр}; 0,3; 0,5; 0,7; 1,0$) и для каждого из них по указанной формуле рассчитывается момент. Строится график $M = f(s)$.

Для тех же значений скольжения определяется частота вращения ротора n , $n = n_1(1-s)$. Используя зависимости $M = f(s)$, $n = f(s)$, можно построить график механической характеристики $n = f(M)$.

Из графика $M = f(s)$ при $s = 1$ определяется $M_{п}$.

Вращающий момент асинхронного двигателя зависит от U_1^2 . При снижении напряжения на 15 % получим новые значения моментов $M_{п}' = (0,85)^2 M_{п}$, $M_{\max}' = (0,85)^2 M_{\max}$. Если $M_{п}'$ будет больше момента нагрузки M_C ($M_C = M_H$), то двигатель запустится, если $M_{п}' < M_C$, то – нет.

3. ВОПРОСЫ РАБОЧЕЙ ПРОГРАММЫ ПО ТЕМАМ 3 И 4

Тема 3 «Трансформаторы»

Принцип действия и устройство трансформаторов. Основные элементы конструкции и их назначение. Классификация и условные обозначения.

Холостой ход трансформатора. Теория рабочего процесса. Уравнения электрического состояния первичной и вторичной обмотки. Приведение параметров вторичной обмотки трансформатора к числу витков первичной. Схема замещения. Опыты холостого хода и короткого замыкания. Изменение вторичного напряжения трансформатора при нагрузке. Внешние характеристики. Потери и КПД трансформатора.

Тема 4 «Асинхронные электродвигатели»

Принцип образования вращающегося магнитного поля. Направление и частота вращения.

Устройство, теория рабочего процесса асинхронной машины к рабочему процессу трансформатора. Векторная диаграмма, схемы замещения, энергетическая диаграмма. Потери и КПД. Электромагнитный момент, механическая характеристика. Рабочие характеристики асинхронного двигателя. Пуск и регулирование частоты вращения асинхронных двигателей. Тормозные режимы. Однофазный асинхронный двигатель.

4. УЧЕБНАЯ ЛИТЕРАТУРА

а) основная учебная литература:

1. Гордеев-Бургвиц, М. А. Общая электротехника и электроника [Текст]: учебное пособие / М. А. Гордеев-Бургвиц. – М.: Московский государственный строительный университет, Ай Пи Эр Медиа, ЭБС АСВ, 2015. – 331 с. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/35411>

2. Бутырин, П. А. Основы электротехники [Текст]: учебник для студентов средних и высших учебных заведений профессионального образования по направлениям электротехники и электроэнергетики / П. А. Бутырин, О. В. Толчеев, Ф. Н. Шакирзянов. – М.: Издательский дом МЭИ, 2014. – 360 с. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.iprbookshop.ru/33220>

б) дополнительная учебная литература:

3. Алиев, И. И. Электротехника и электрооборудование [Текст]: справочник. Учебное пособие для вузов / И. И. Алиев. – Саратов: Вузовское образование, 2014. – 1199 с. [Электронный ресурс] – URL: <http://www.iprbookshop.ru/9654>

4. Усольцев, А. А. Линейные электрические цепи [Текст]: учебное пособие / А. А. Усольцева. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 151 с.

5. Усольцев, А. А. Общая электротехника [Текст]: учебное пособие / А. А. Усольцева. – 2-е изд., перераб и доп. – СПб.: НИУ ИТМО, 2013. – 305 с.

6. Жаворонков, М. А. Электротехника и электроника [Текст]: учебное пособие для студ. вузов / М. А. Жаворонков, А. В. Кузин. – М.: «Академия», 2005. – 400 с.

7. Касаткин, А. С. Электротехника [Текст]: учебник для вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М.: «Академия», 2007. – 544 с.

5. Макенова Н. А. Решебник по электротехнике [Текст]: учебное пособие / Н. А. Макенова, Т. Е. Хохлова; Томской политехнический университет. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2015. – 165 с.

Перечень учебно-методического обеспечения для самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Электротехника. Часть I [Текст]: лабораторный практикум / В. К. Пономаренко, В. И. Королев, В. Д. Кулик, В. П. Николаев. – СПб.: СПбГТУРП, 2012. – 63 с.

2. Пономаренко, В. К. Промышленная электроника [Текст]: лабораторный практикум / В. К. Пономаренко. – СПб.: СПбГТУРП, 2009. – 61 с.

3. Елизов, Н. Я. Промышленная электроника. Часть I [Текст]: методические указания к лабораторным работам / Н. Я. Елизов, В. П. Николаев, В. И. Королев. – СПбГТУРП, 2007. – 61 с.

4. Пономаренко, В. К. Электротехника. Часть II [Текст]: лабораторный практикум / В. К. Пономаренко– СПб.: СПбГТУРП, 2013. – 60 с.

5. Касаткин, А. С. Электротехника [Текст]: учебник для студентов неэлектротехнических специальностей вузов / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – М.: Академия 2008. – 539 с.

6. Пономаренко, В. К. Электротехника. Часть 1 [Текст]: учебное пособие / В. К. Пономаренко – СПб.: СПбГУРП, 2010. – 105 с. [Электронный ресурс]. – URL: <http://www.nizrp.narod.ru/ponomorenko.pdf>

7. Пономаренко, В. К. Электротехника. Часть 2 [Текст]: учебное пособие / В. К. Пономаренко. – СПб.: СПбГУРП, 2011. – 95 с.

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

1. Информационная система «Единое окно доступа к образовательным ресурсам». [Электронный ресурс]. – URL: <http://window.edu.ru/>

ПРИЛОЖЕНИЕ

Пример выполнения титульного листа.

«САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПРОМЫШЛЕННЫХ ТЕХНОЛОГИИ И ДИЗАЙНА»	
<hr/>	
ВЫСШАЯ ШКОЛА ТЕХНОЛОГИИ И ЭНЕРГЕТИКИ	
Кафедра автоматизированного электропривода и электротехники	
Контрольная работа №2	
по дисциплине «Электротехника и электроника»	
Вариант № 00	
Выполнил:	студент учебной группы № 0-000 Зачетная книжка № 000000
	<hr/> <i>(фамилия, имя, отчество)</i>
Проверил:	
	<hr/> <i>(должность, фамилия, имя, отчество)</i>
Санкт-Петербург 2021	