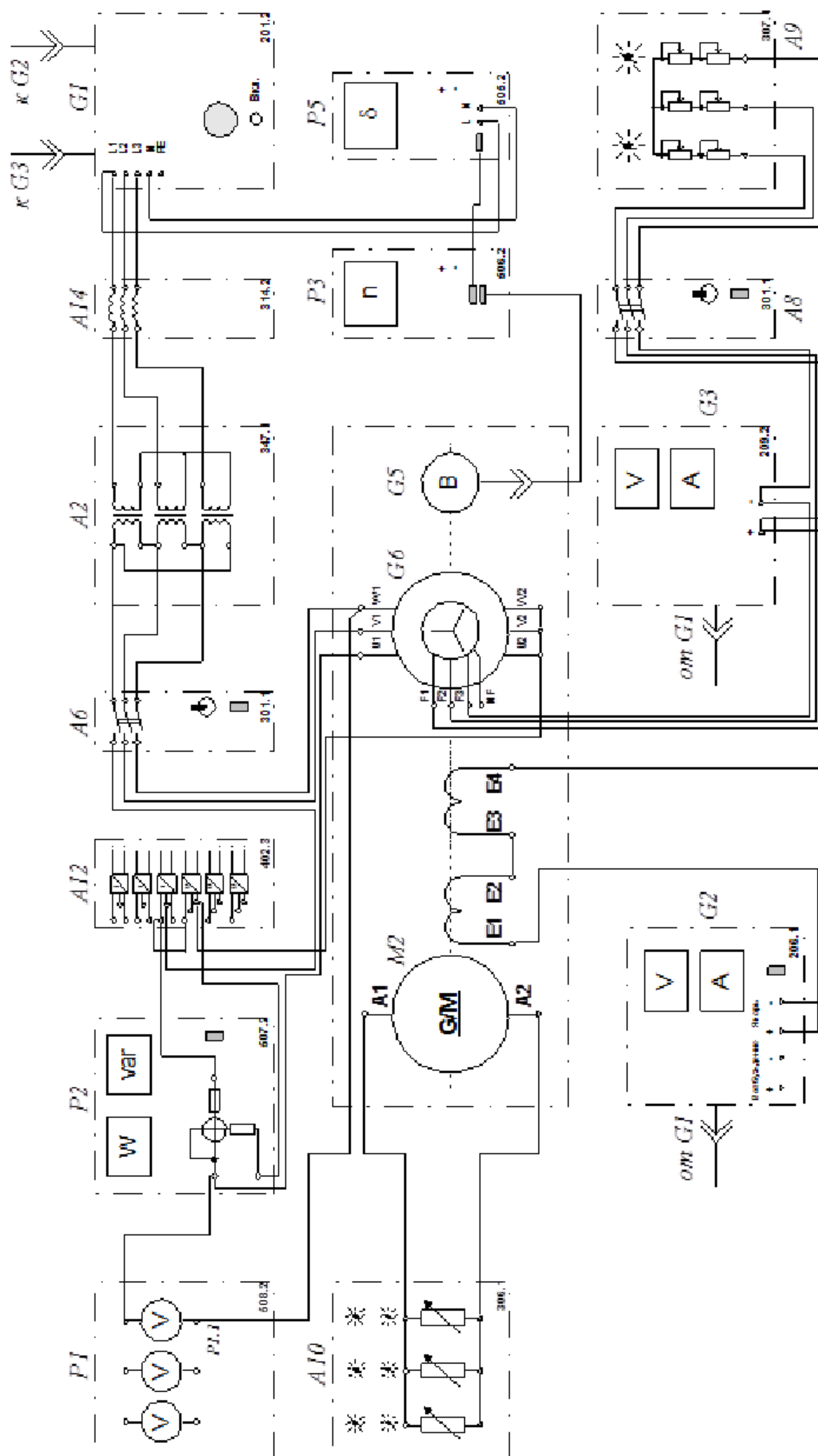




ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Указания по проведению эксперимента

- Осуществите пуск в ход синхронного двигателя М1 в соответствии с указаниями по проведению эксперимента раздела 6.1 настоящего руководства (без включения источника G2).
- Включите выключатели "СЕТЬ" блока мультиметров Р1 и указателя угла нагрузки Р5.
- Активизируйте мультиметры блока Р1, задействованные в эксперименте.
- Регулировочную рукоятку источника G2 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки нагрузки А10 установите в положение "100%".
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, изменяйте угол нагрузки δ двигателя М1 в диапазоне $0 \dots 85^\circ$ и заносите показания указателя Р5 (угол нагрузки δ), ваттметра (активная мощность P_1 , потребляемая одной фазой двигателя М1) и варметра (реактивная мощность Q_1 , потребляемая одной фазой двигателя М1) измерителя мощностей Р2 и мультиметра (линейное напряжение U двигателя М1) блока Р1 в таблицу 1.2.1.

Таблица 1.2.1

δ , град										
P_1 , Вт										
Q_1 , ВАр										

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
U, В ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- В случае перехода двигателя М1 в асинхронный режим работы разгружайте его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа двигателя М1 с сетью.
- По завершении эксперимента нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника G1 и отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные табл. 1.2.1, вычислите для каждого значения угла δ и занесите в табл. 1.2.2 полные активную $P=3P_1$ и реактивную $Q=3Q_1$, потребляемые двигателем М1.

Таблица 1.2.2

δ , град										
P, Вт										
Q, ВАр										

- Используя данные табл. 1.2.1 и 1.2.2, постройте искомые угловые характеристики $P=f(\delta)$, $Q=f(\delta)$, $U=f(\delta)$ трехфазного синхронного двигателя.

*Снятие U–образной характеристики $I=f(I_f)$
трехфазного синхронного двигателя*

Перечень аппаратуры

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
G1	Трёхфазный источник питания	01.2	~ 400 В / 16 А
G2	Источник питания двигателя постоянного тока	06.1	– 0...250 В /3 А (якорь) /– 200 В / 1 А (возбужде- ние)
G3	Возбудитель синхронной машины	09.2	– 0...40 В / 3,5 А
G4	Машина постоянного тока	01.2	90 Вт / 220 В /0,56 А (якорь) /2×110 В / 0,25 А (возбуждение)
G5	Преобразователь угловых перемещений	04	6 вых. каналов / 2500 импульсов за оборот
M1	Машина переменного тока	02.1	100 Вт / ~ 230 В / 1500 мин ⁻¹
A2	Трёхфазная трансформаторная группа	47.1	3×80 В·А /230 В/242,235, 230, 226, 220, 133, 127 В
A6	Трёхполюсный выключатель	01.1	~ 400 В / 10 А
A9	Реостат для цепи ротора машины	07.1	3 × 0...40 Ом / 1 А

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

A10	Активная нагрузка	06.1	220 В / 3×0...50 Вт;
A14	Линейный реактор	14.2	$3 \times 0,3 \text{ Гн} /$ 0,5 А
P1	Блок мультиметров	08.2	3мультиметра0...100 0 В /0...10 А /0...20 МОм
P2	Измеритель мощностей	507.2	15; 60; 150; 300; 600 В /0,05; 0,1; 0,2; 0,5 А.
P3	Указатель частоты вращения	06.2	-2000...0...2000 мин ⁻¹

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Описание электрической схемы соединений

Источник G1 - источник синусоидального напряжения промышленной частоты.

Источник питания двигателя постоянного тока G2 используется для питания регулируемым напряжением обмотки возбуждения машины постоянного тока G4, работающей в режиме генератора с независимым возбуждением.

Активная нагрузка A10 используется для нагружения генератора G4.

Возбудитель G3 служит для питания обмотки возбуждения машины переменного тока M1, работающей в режиме синхронного двигателя.

Преобразователь угловых перемещений G5 генерирует импульсы, поступающие на вход указателя частоты вращения P3 электромашинного агрегата.

Машина (синхронный двигатель) M1 получает питание от источника G1 через трехфазную трансформаторную группу A2 и выключатель A6.

Реостат A9 выполняет роль резистора синхронизации и подключается выключателем A8 к обмотке возбуждения синхронного двигателя M1 на этапе пуска последнего.

С помощью линейного реактора моделируется сопротивление кабеля, питающего двигатель M1.

С помощью мультиметра блока P1 контролируется линейное напряжение статорной обмотки двигателя M1.

С помощью измерителя P2 контролируется активная мощность, потребляемая испытуемым двигателем M1.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

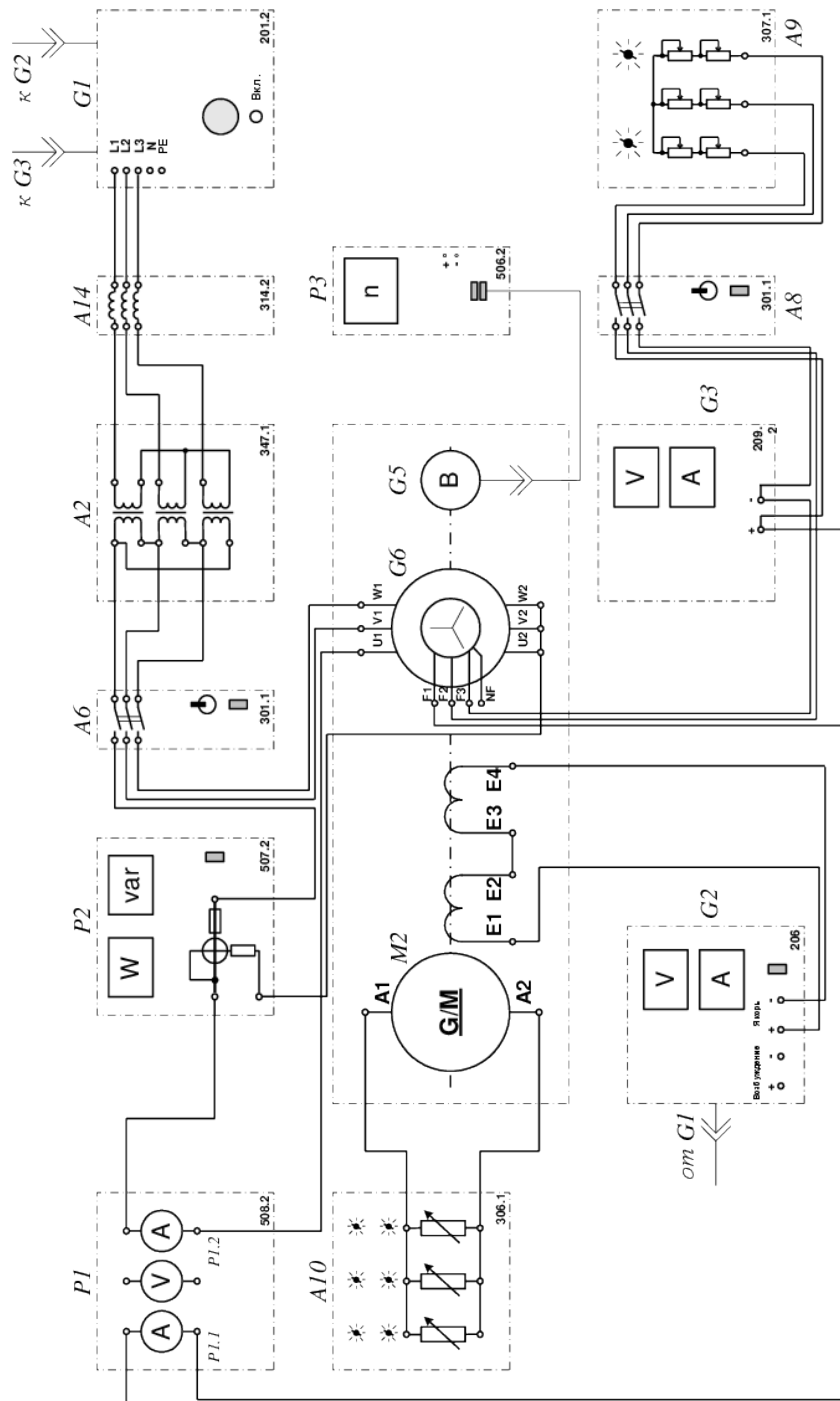


Рисунок 9.8-Электрическая схема соединений

Указания по проведению эксперимента

- Осуществите пуск в ход синхронного двигателя M1 в соответствии

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
(без включения источника G2).
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

с указаниями по проведению эксперимента раздела 6.1 настоящего руководства

- Регулировочную рукоятку источника G2 поверните против часовой стрелки до упора.
- Регулировочные рукоятки нагрузки A10 установите в положение "100%".
- Включите выключатель «СЕТЬ» блока мультиметров P1.
- Активизируйте мультиметры блока P1, задействованные в эксперименте.
- Включите выключатель "СЕТЬ" и нажмите кнопку "ВКЛ." источника G2.
- Вращая регулировочную рукоятку источника G2, установите полную активную мощность, потребляемую двигателем M1 из сети, например, 60 Вт (определяется утроением показаний ваттметра измерителя P2) и поддерживайте её в ходе эксперимента неизменной.
- Вращая регулировочную рукоятку возбудителя G3, изменяйте ток возбуждения I_f (в диапазоне до 2 А) двигателя M1 и записывайте показания амперметров P3.2 (ток I_f) и P3.3 (ток I статорной обмотки двигателя) в таблицу 1.3.

Таблица 1.3

I_f , А										
I , А										

- В случае перехода двигателя M1 в асинхронный режим работы разгружайте его по активной мощности, вращая регулировочную рукоятку источника G2 против часовой стрелки до тех пор, пока не восстановится синхронная работа двигателя M1 с сетью.

- По завершении эксперимента нажмите кнопку «ОТКЛ.» источника G1 и отключите выключатели «СЕТЬ» блоков, задействованных в эксперименте.
- Используя данные табл. 1.3, постройте искомую U–образную характеристику $I=f(I_f)$ трехфазного синхронного двигателя.

Контрольные вопросы

1. Поясните способ использования обмоток СД по назначению.
2. Какие механические характеристики СД рассчитываются и используются для управления СД?
3. Как влияет величина пускового сопротивления в цепи ОВ на пусковой и подсинхронный моменты?
4. Поясните схемы пуска СД, отметив их достоинства и недостатки.
5. Как СД можно использовать для компенсации реактивной мощности индуктивного характера в сети?

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Приложение А

До начала работы студенты обязаны изучить правила техники безопасности при работе с электроустановками. Об изучении правил техники безопасности и получении инструктажа студенты расписываются в специальном журнале. Студенты, не изучившие правила техники безопасности и не прошедшие инструктаж, к выполнению лабораторных работ не допускаются.

Учебная группа (или подгруппа) разбивается на бригады, число которых указывается преподавателем, а состав бригад комплектуется студентами на добровольных началах. Список группы (подгруппы), разбитой на бригады, староста предоставляет преподавателю, ведущему лабораторные занятия.

Каждая из бригад выполняет лабораторную работу в соответствии с графиком, находящемся в лаборатории.

Перед каждым занятием студент обязан подготовиться к выполнению лабораторной работы по данному методическому пособию и рекомендуемой литературе. Перед началом работы преподаватель проверяет знания студентов по содержанию выполняемой работы. Плохо подготовленные студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Работая в лаборатории, необходимо соблюдать следующие правила:

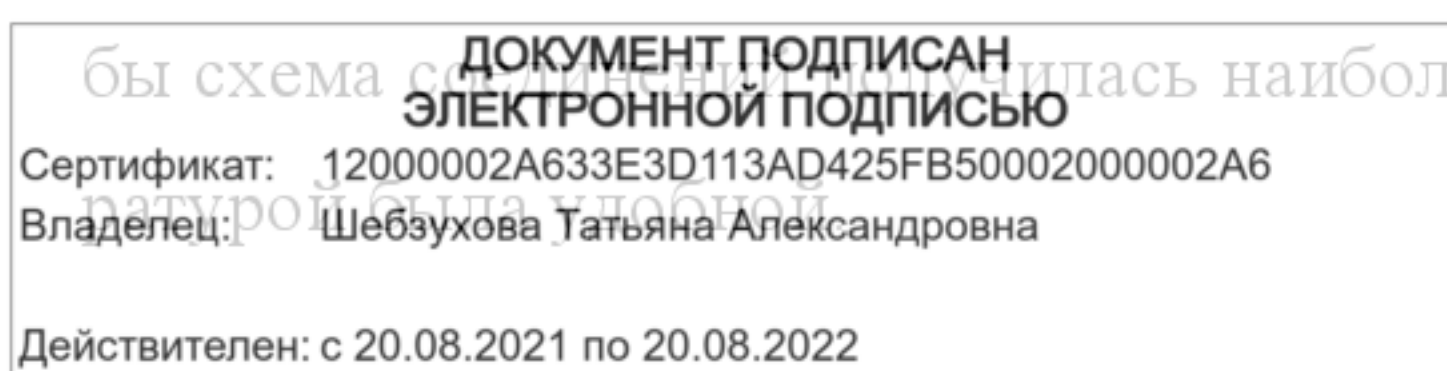
К выполнению лабораторной работы следует приступать только после полного уяснения ее содержания и получения допуска к ней.

2. Начинать работу следует с ознакомления с приборами и оборудованием, применяемыми в данной работе.

3. На лабораторном столе должны находиться только предметы, необходимые для выполнения данной работы.

4. Расположение аппаратуры на рабочем столе должно быть таким, что-

бы схема соединения проводов была наиболее простой, наглядной и работа с аппа-



5. Желательно, чтобы схему собирал один из членов бригады, а другие контролировали.

6. При сборке сложных схем следует вначале соединить главную, последовательную цепь, начиная сборку от одного зажима источника тока и заканчивая на другом, а затем уже подключить параллельные цепи.

7. После того как схема будет собрана, необходимо убедиться в правильной установке движков реостатов, автотрансформаторов и рукояток других регулирующих устройств.

8. Собранная схема обязательно должна быть проверена преподавателем или старшим лаборантом и только с их разрешения может быть включена под напряжение.

9. При включении схемы особое внимание следует обратить на показания амперметров и других измерительных приборов. В случае резкого движения стрелки амперметра к концу шкалы схему необходимо немедленно отключить от источника напряжения.

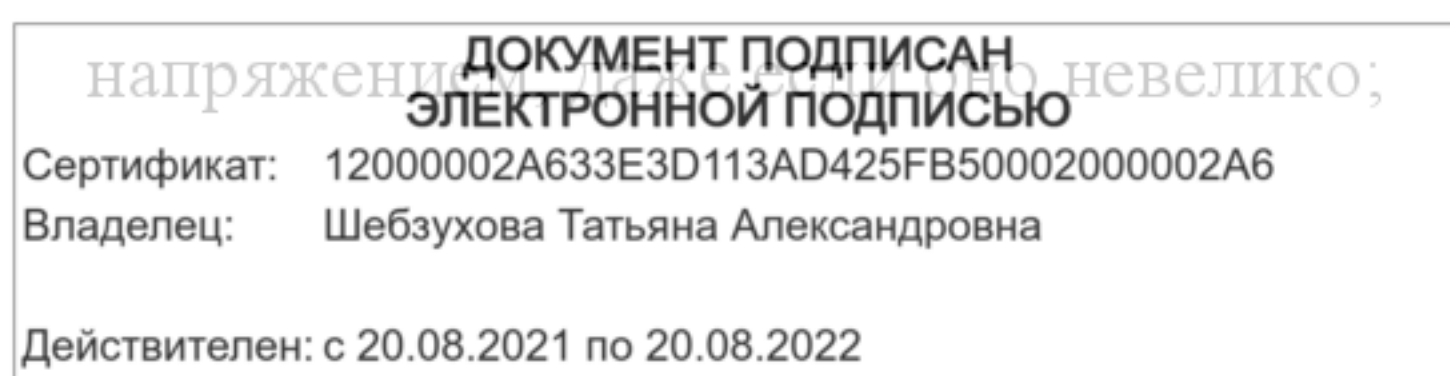
10. Необходимо бережно относиться к аппаратуре, используемой в работе. Обо всех замеченных неисправностях или повреждениях студент должен немедленно сообщить преподавателю или лаборанту.

11. После выполнения работы студент обязан, не разбирая схемы показать полученные данные преподавателю. Если результаты измерений верны, то преподаватель их подписывает. Эксперимент с неправильными результатами следует повторить.

12. Схему следует разбирать только после ее отключения от сети.

13. Категорически запрещается:

– трогать руками оголенные провода и части приборов, находящиеся под



- производить изменения в схеме при подключенном источнике питания;
- заменять или брать оборудование, или приборы с других рабочих мест
- без разрешения преподавателя или лаборанта;
- отходить от приборов и машин, находящихся под напряжением или оставлять схему под напряжением при обработке результатов измерений;
- перегружать приборы током или напряжением, превышающим номинальное значение.

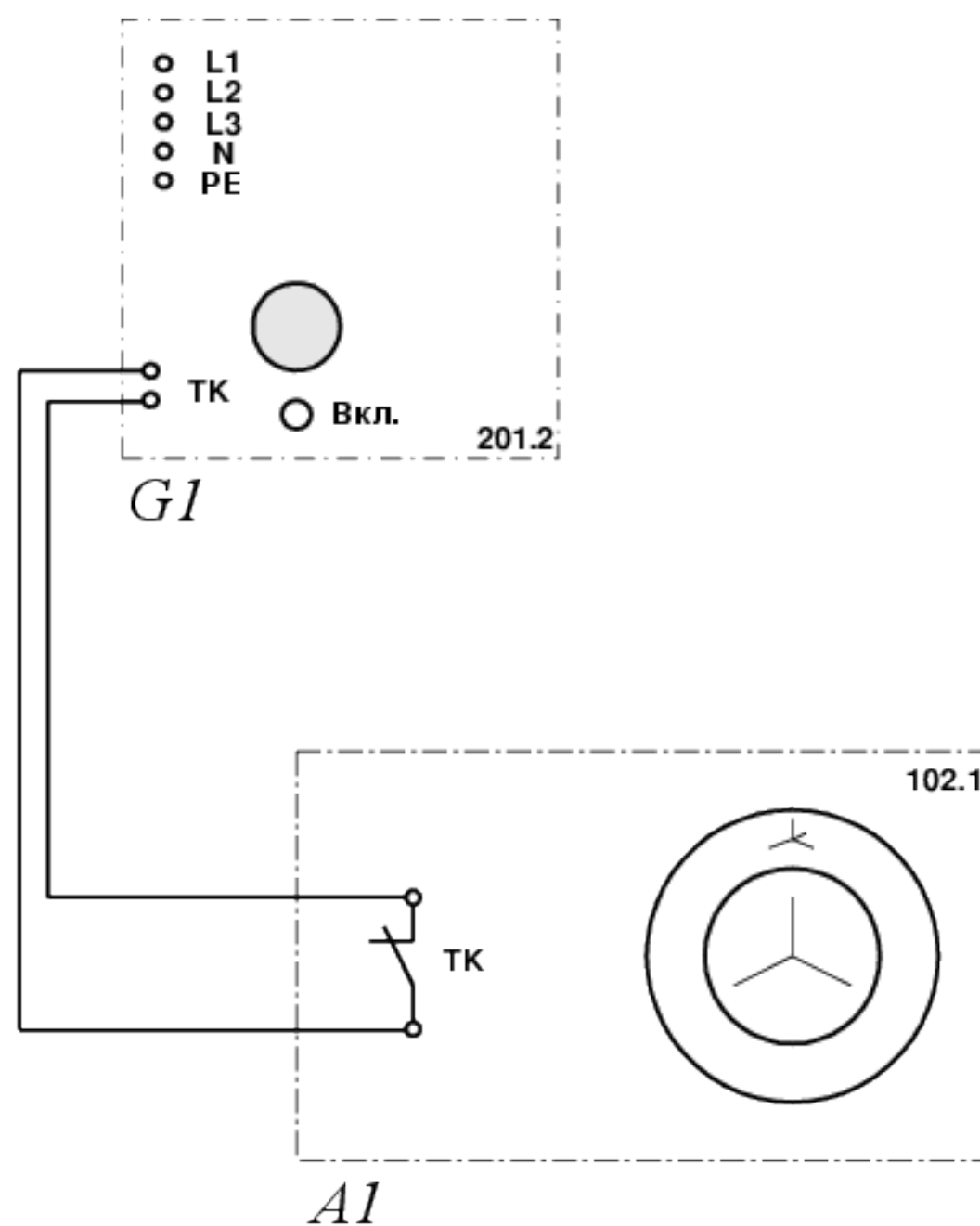
Проверку наличия, подаваемого к схеме или элементам схемы напряжения необходимо производить только контрольной лампочкой или вольтметром, соблюдая правила техники безопасности.

При работе в лаборатории следует строго соблюдать меры предосторожности, так как электрический ток, проходящий через тело человека, величиной в 0,025 А уже является опасным для жизни

Приложение Б

- **Электрическая схема соединений тепловой защиты машины переменного тока**

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	



Перечень аппаратуры

Обозначение	Наименование	Тип	Параметры
A1	Машина переменного тока	102.1	100 Вт / 230 В ~ / 1500 мин⁻¹
G1	Трехфазный источник питания	201.2	400 В ~ / 16 А

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине

1. Методические рекомендации для подготовки к практическим занятиям.
2. Методические рекомендации для подготовки к лабораторным занятиям.
3. Методические рекомендации по организации самостоятельной работы студентов.

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

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Перечень основной и дополнительной литературы

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по выполнению практических работ
по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Содержание

№ п/п	Стр.
	Введение
1.	Цель и задачи изучения дисциплины
2.	Оборудование и материалы
3.	Наименование практических работ
4.	Содержание практических работ
4.1	Практическая работа №1 Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе.
4.2	Практическая работа №2 Работа трансформатора под нагрузкой.
4.3.	Практическая работа №3 Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора.
4.4	Практическая работа №4 Трансформация трехфазных токов.
4.5	Практическая работа №5 Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора.
4.6	Практическая работа №6 Магнитное поле взаимной индукции многофазной обмотки машины переменного тока. Способы подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока.
4.7	Практическая работа №7 Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока.
4.8	Практическая работа №8 Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке.
4.9	Практическая работа №9 Режимы работы машины постоянного тока.
5	Учебно-методическое и информационное обеспечение дисциплины
5.1	Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для освоения дисциплины
5.2	Перечень учебно-методического обеспечения самостоятельной работы обучающихся по дисциплине
5.3	Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети Интернет, необходимых для освоения дисциплины

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Введение

Практические занятия создают оптимальные дидактические условия для деятельностного освоения студентами содержания и методологии изучаемой дисциплины «Электрические машины», использование специального лабораторного оборудования и технических средств. Практические занятия занимают преимущественное место при изучении общепрофессиональных и профессиональных дисциплин. Практические занятия проводятся с целью выработки практических умений и приобретения навыков в решении задач, отработки упражнений, выполнении чертежей, производстве расчётов и т.п.

Целью практических занятий является формирование практических умений – профессиональных (выполнять определённые действия, операции, необходимые в последующем в профессиональной деятельности) или учебных, необходимых в последующей учебной деятельности по общепрофессиональным и профессиональным дисциплинам.

Библиографический список содержит сведения о справочной литературе и дополнительных изданиях, необходимых для углубленного изучения отдельных вопросов.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1. Цель и задачи изучения дисциплины

Дисциплина «Электрические машины» изучается студентами, обучающимися по направлению подготовки бакалавриата «13.03.02 Электроэнергетика и электротехника». Целью изучения дисциплины является ознакомление студентов с основами теории и эксплуатационными характеристиками электрических машин и трансформаторов, а также теоретической базы и знаний в области электромеханического и статистического преобразования энергии, принципа действия основных видов электрических машин и трансформаторов и особенностей их применения.

Исходя из поставленных целей, задачами изучения дисциплины являются:

- получение практических навыков эксплуатации, и проектирования электрических машин в составе объектов электроэнергетики;
- знание материалов, применяемых при производстве генераторов и электрических двигателей;
- умение предотвращения аварии и выхода из строя электрической машины;
- умение принимать и обосновывать конкретные технические решения конструирования электроэнергетического оборудования.

2. Оборудование и материалы

Комплект учебно-лабораторного оборудования

«Энергосбережение в системах электроснабжения и электропотребления». Комплект учебно-лабораторного оборудования

«Автоматизированная система контроля и учета электроэнергии». Комплект учебно-лабораторного оборудования «Электрические станции и подстанции». Комплект учебно-лабораторного оборудования «Умная местная распределительная электрическая сеть». Научно-исследовательский комплекс «Оптимизация режимов работы электрических сетей с активными элементами, выполненными на базе силовых полупроводниковых преобразователей», исполнение стендовое компьютерное. Научно-исследовательский комплекс «Автоматизированные средства управления и защиты в системах электроснабжения промышленных предприятий», исполнение стендовое компьютерное. Научно-исследовательский комплекс

«Применение автоматизированных систем контроля и учета электроэнергии с целью повышения эффективности эксплуатации систем электроснабжения», исполнение стендовое ручное. Комплект типового лабораторного оборудования «Теоретические основы электротехники». Комплект типового лабораторного оборудования «Электротехнические материалы». Комплект типового лабораторного оборудования «Электротехнические машины». Комплект типового лабораторного оборудования «Электротехнические материалы».

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН	
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

торное оборудование «Электроэнергетика-релейная защита и автоматика». Учебный стенд «Теория электрических цепей и основы электротехники».

3. Наименование практических работ

№ Темы дисциплины	Наименование тем дисциплины, их краткое содержание	Объем часов	Из них практическая подготовка, часов
4 семестр			
1	Практическая работа № 1. Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе. Изучить электромагнитные процессы холостого хода трансформатора.	1,5	—
2	Практическая работа № 2. Работа трансформатора под нагрузкой. Изучить работу нагруженного трансформатора.	1,5	—
3	Практическая работа №3. Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора. Изучить соединения трёхфазного трансформатора звездой и треугольником.	1,5	—
4	Практическая работа №4. Трансформация трехфазных токов. Изучение трансформации оков в трёхфазной системе.	1,5	—
5	Практическая работа №5. Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора. Научиться рассчитывать параметры трансформатора и определять потери.	1,5	—
6	Практическая работа №6. Магнитное поле взаимной индукции многофазных машин переменного тока. Изучение гармоник ЭДС машин переменного тока.	1,5	—

6
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	Расчёт магнитного поля взаимной индукции многофазной обмотки машины переменного тока. Изучение способов подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока.		
7	Практическая работа №7. Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока. Научиться рассчитывать построение якорной обмотки машины постоянного тока	1,5	—
8	Практическая работа №8. Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке. Научиться расчёту магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке.	1,5	—
9	Практическая работа №9. Режимы работы машины постоянного тока. Изучить режимы работы машин постоянного тока.	1,5	—
	Итого за 4 семестр:	13,5	—
5 семестр			
19	Практическая работа №10. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе. Изучить электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе.	3	—
20	Практическая работа №11. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке. Изучить электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке.	3	—
21	Практическая работа №12. Потери, КПД асинхронного двигателя. Научиться расчёту потерь и КПД асинхрон-	3	—
	Практическая работа №13. Механическая характеристика асинхронного	3	—

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
 ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
 Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
 Владелец: 22 Шебзухова Татьяна Александровна
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

	двигателя. Научиться рассчитывать механическую характеристику асинхронного двигателя.		
23	Практическая работа №14. Однофазный асинхронный двигатель. Изучить строение и характеристики однофазного асинхронного двигателя.	3	—
24	Практическая работа №15. Пусковые свойства асинхронного двигателя. Расчёт пусковых характеристик АД.	3	—
25	Практическая работа №16. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя. Изучить решения по регулированию частоты вращения асинхронного двигателя.	3	—
26	Практическая работа №17. Электромагнитные процессы в синхронной машине. Расчёт электромагнитных процессов в синхронной машине.	3	—
27	Практическая работа №18. Построение векторных диаграмм синхронного генератора. Научиться строить векторные диаграммы синхронного генератора.	3	—
Итого за 5 семестр		27	—
Итого		40,5	—

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Описание практических занятий

- **Практическое занятие №1.**

- **Тема.** Электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе

-

Цель занятия: Изучить электромагнитные процессы в трансформаторе при холостом ходе.

Теоретическая часть.

Под холостым ходом трансформатора понимают такой режим его работы, при котором к зажимам первичной обмотки приложено напряжение, а вторичная обмотка разомкнута. Холостой ход – это предельный режим работы, позволяющий определить такие важные величины как: коэффициент трансформации, ток холостого хода трансформатора, потери при холостом ходе трансформатора.

Пусть к зажимам первичной обмотки трансформатора приложено гармоническое напряжение,

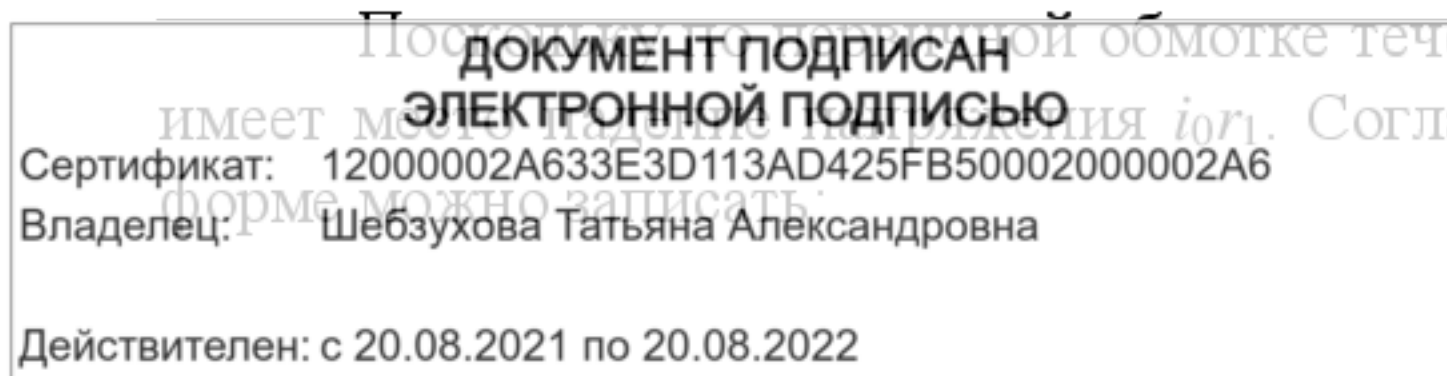
$$u_1 = \sqrt{2}U_1 \sin \omega t; \quad (1.1)$$

под действием которого по обмотке течёт ток i_0 . Этот ток создаёт намагничивающую силу $i_0 w_1$, где w_1 – число последовательно соединённых между собой витков первичной обмотки. Н.с. первичной обмотки вызывает появление магнитного потока. Этот поток имеет несколько составляющих: Φ_0 – основной поток, составляющий большую часть суммарного потока, замыкается по сердечнику и сцепляется с обеими обмотками; $\Phi_{\sigma 1}$ поток рассеяния первичной обмотки, замыкается вне сердечника, сцепляется только с первичной (возможно частично со вторичной) обмоткой.

Первичная обмотка подводит напряжение, а вторичная обмотка разомкнута, то есть вторичный ток равен нулю.

Поток Φ_0 наводит в первичной обмотке основную ЭДС, e_1 и во вторичной - e_2 . Поток $\Phi_{\sigma 1}$ – создаёт в первичной обмотке ЭДС рассеяния $e_{\sigma 1}$.

Поскольку по первичной обмотке течёт ток i_0 , то на активном её сопротивлении r_1 имеет место падение напряжения $i_0 r_1$. Согласно второму закону Кирхгофа, в векторной форме можно записать:



$$U_1 = E_1 = E_{\Sigma 1} = I_0 r_1; \quad (1.2)$$

В трансформаторах обычной конструкции поток рассеяния при холостом ходе ($P_{ct} = 0$) мал, r_1 тоже мало и $I_0 r_1 = E_{\Sigma 1}$ обычно не превышает 5% от U_1 . Поэтому в первом приближении этой разностью можно пренебречь.

Тогда уравнение (1.2) имеет вид :

$$U_1 = E_1; \quad (1.3)$$

то есть при холостом ходе напряжение, подведённое к обмотке трансформатора, практически уравнивается только ЭДС, создаваемой в этой обмотке основным магнитным потоком.

Выражение (1.4) является основным в теории трансформаторов для расчёта действующего значения ЭДС.

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m \quad (1.4)$$

Вторичная обмотка пронизывается тем же потоком Φ_m , поэтому действующее значение ЭДС вторичной обмотки, аналогично уравнению (1.4), можно записать в виде:

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (1.5)$$

Отношение E_1 к E_2 называется коэффициентом трансформации трансформатора:

$$k = E_1 / E_2 = w_1 / w_2. \quad (1.6)$$

Мощность P_0 , потребляемая трансформатором в режиме х.х. расходуется только на потери в стали.

Контрольные вопросы и задания:

1. Какие параметры трансформатора позволяет определить такой режим работы, как холостой ход?
2. Как определить действующее значение ЭДС трансформатора?
3. Что такое коэффициент трансформации, как его определить?
4. На что расходуется мощность, потребляемая трансформатором при холостом ходе?

• **Задачи**

1. Определить номинальный ток вторичной обмотки I_{2H} однофазного трансформатора, если номинальная мощность $S_H = 20$ кВА, номинальное напряжение первичной обмотки $k = 15$. $U_{1H} = 10$ кВ, коэффициент трансформации

2. Определить номинальную мощность трехфазного трансформатора S_H и номинальный ток первичной обмотки I_{1H} , если номинальное напряжение первичной обмотки $U_{1H} = 20$ кВ, номинальное напряжение вторичной обмотки $U_{2H} = 0.4$ кВ, номинальный ток вторичной обмотки $I_{2H} = 150$ А. Найти действующие значения ЭДС в обмотках E_1 и E_2 , если максимальный магнитный поток $\Phi_{\max} = 0.02$ Вб, частота тока $f = 50$ Гц, числа витков первичной и вторичной обмоток соответственно $W_1 = 100$, $W_2 = 50$.

3. Максимальный магнитный поток в сердечнике однофазного трансформатора $\Phi_{\max} = 0.02$ Вб, число витков первичной обмотки $W_1 = 500$. Определить коэффициент трансформации k и подведенное напряжение U_1 , если напряжение на зажимах вторичной обмотки в режиме холостом ходе $U_{2o} = 127$ В, частота напряжения сети $f = 50$ Гц.

4. Трансформатор включен в сеть переменного тока промышленной частоты. Индуктивность рассеяния первичной обмотки $L_{\sigma 1} = 0.001$ Гн. Определить индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки $x_{\sigma 1}$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- **Практическое занятие №2.**
- **Тема.** Работа трансформатора под нагрузкой

Цель занятия. Изучить работу нагруженного трансформатора.

Знания и умения, приобретаемые студентом в результате освоения темы:

В результате выполнения практического занятия у студента формируются

- **Теоретическая часть**

В паспорте трехфазных трансформаторов дается номинальная мощность и мощность потерь всех трех фаз; под номинальными напряжениями понимаются линейные напряжения на зажимах трансформатора в режиме холостого хода, а под номинальными токами — линейные токи независимо от схемы соединения обмоток.

Полная мощность трехфазного двухобмоточного трансформатора, $S_{\text{н}}$,

$$S_{\text{н}} = \sqrt{3} U_{\text{лн}} * I_{\text{лн}} \quad (2.1)$$

Отношение ЭДС обмотки высшего напряжения к ЭДС обмотки низшего напряжения, равное отношению числа витков этих обмоток, называется коэффициентом трансформации:

$$k = E_{\text{лн}}/E_{\text{нн}} = w_1/w_2 \quad (2.2)$$

Трансформатор, у которого параметры вторичной цепи приведены к числу витков первичной обмотки w_1 , называется приведенным трансформатором. Такому трансформатору соответствует электрическая схема замещения (рис. 2.1) и основные уравнения:

$$\begin{aligned} \dot{U} &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1); \\ \dot{U}'_2 &= \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 Z'_2 = \dot{E}'_2 - j\dot{I}'_2 x'_2 - \dot{I}'_2 r'_2 \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2) \end{aligned} \quad (2.3)$$

Индуктивные сопротивления первичной x_1 и вторичной x_2 обмоток обусловлены потоками рассеяния $\Phi_{\sigma 1}$ и $\Phi_{\sigma 2}$.

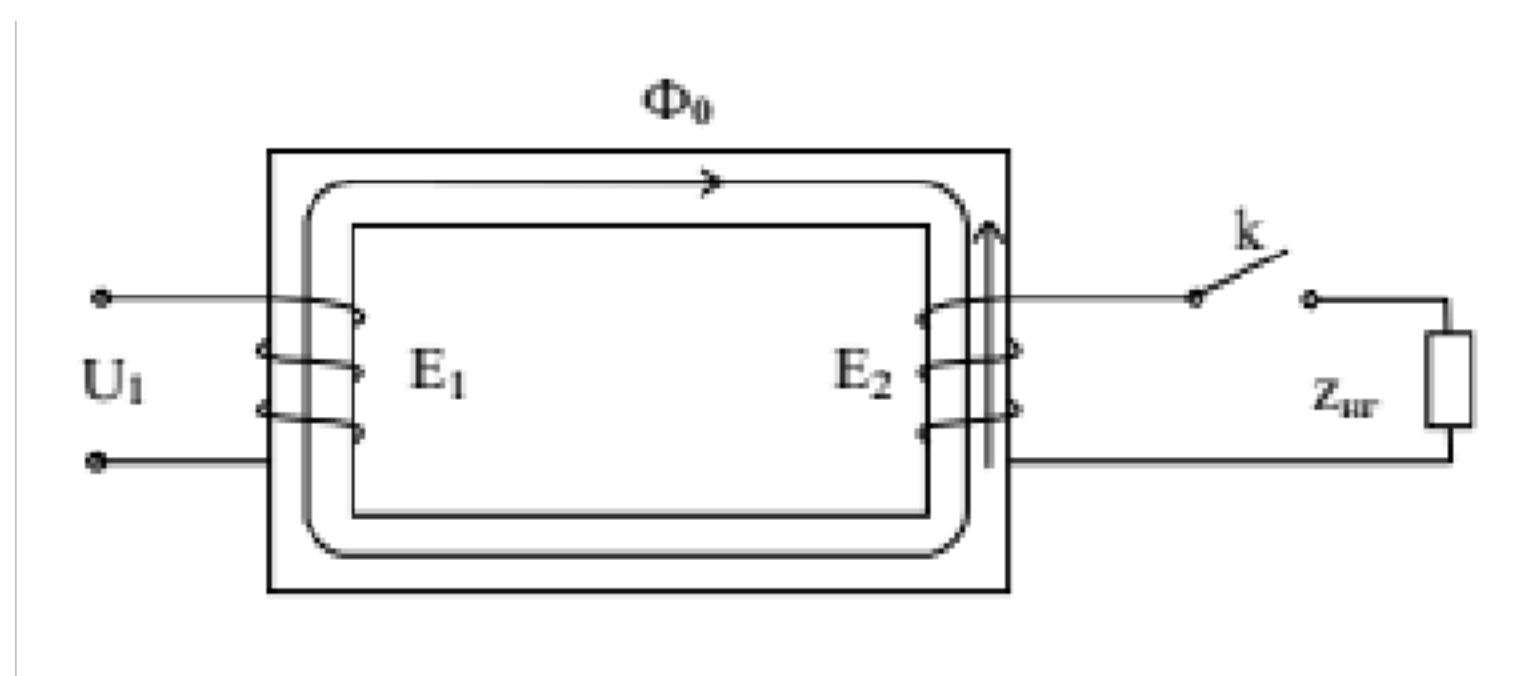


Рисунок 2.1 – Схема замещения трансформатора

Формулы приведения параметров вторичной цепи:

– ток вторичной обмотки

$$I_2' = I_2 * k \quad (2.6)$$

– ЭДС и напряжение вторичной

$$E_2' = E_2 * k, U_2' \approx U_2 * k \quad (2.7)$$

– активное и индуктивное сопротивления вторичной обмотки

$$r_2' = r_2 * k^2, x_2' = x_2 * k^2 \quad (2.8)$$

– полное сопротивление вторичной обмотки

$$z_2' = z_2 * k^2 \quad (2.9)$$

– полное сопротивление нагрузки

$$z_H' = z_H * k^2 \quad (2.10)$$

При изменении нагрузки трансформатора в широком диапазоне (от холостого хода до номинального режима) магнитный поток может считаться практически постоянным и равным магнитному потоку в режиме холостого хода. Это в свою очередь определяет постоянство потерь в стали, которые легко определяются из режима холостого хода.

В режиме «нормального» короткого замыкания магнитный поток в сердечнике трансформатора настолько мал, что им можно пренебречь, а следовательно, при этом режиме потери в стали трансформатора практически равны нулю, а потери в меди (в обмотках трансформатора) равны потерям при номинальной нагрузке трансформатора. Величины токов, напряжений и мощностей, полученные из режимов холостого хода и «нормального» короткого замыкания, позволяют определить основные параметры трансформатора.

$$z_k = U_{kf} / I_{kf} \quad (2.11)$$

– активное

$$r_k = P_k / 3 * I_k^2 \quad (2.12)$$

– реактивное

$$x_k = \sqrt{z_k^2 - r_k^2} \quad (2.13)$$

Сопротивления первичной обмотки

$$r_1 = r_2' = r_k / 2 \quad (2.14)$$

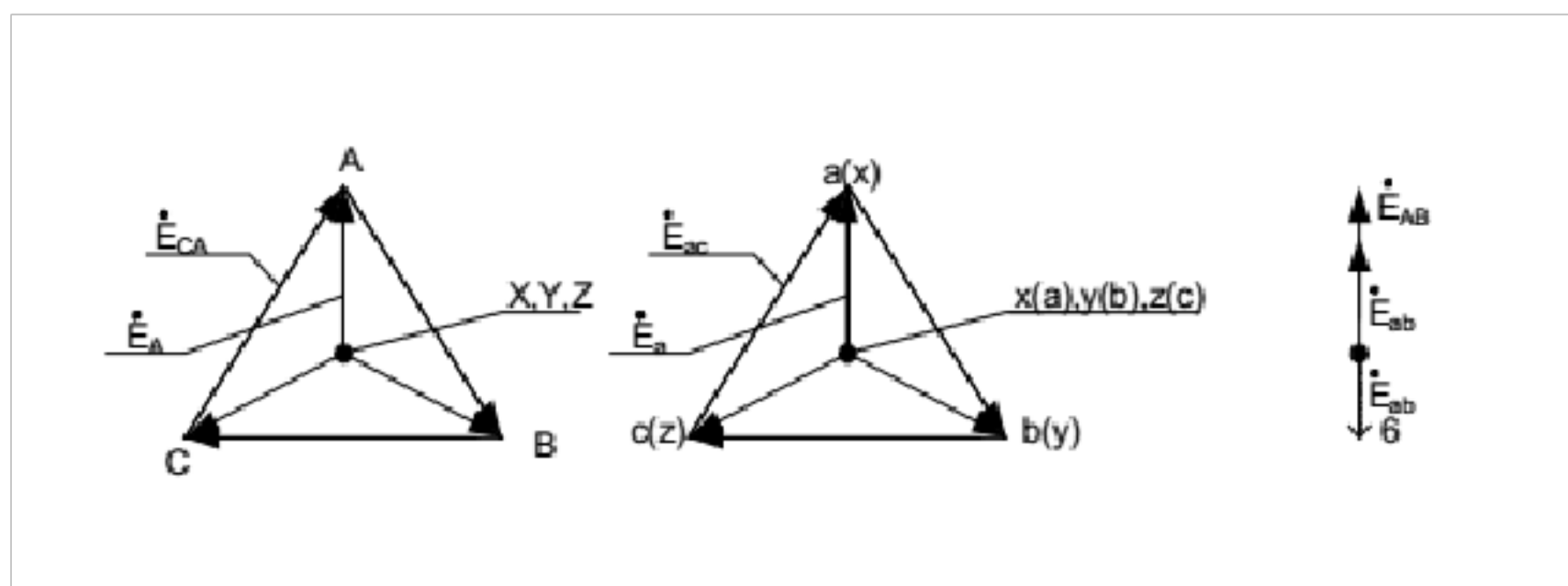
$$x_1 = x_2' = x_k / 2 \quad (2.15)$$

Сопротивления вторичной обмотки

$$r_2 = r_2' / k^2 \quad (2.16)$$

$$x_2 = x_2' / k^2 \quad (2.17)$$

Активная и реактивная составляющие напряжения короткого замыкания



The diagram illustrates the vector relationships for the short-circuit voltage components. It consists of two vector triangles representing the primary and secondary windings, and a vertical vector diagram for the total voltage components. The primary winding triangle has vertices A, B, and C, with vectors $\dot{E}_{CA}$, $\dot{E}_A$, and $\dot{E}_{AB}$. The secondary winding triangle has vertices a(x), b(y), and c(z), with vectors $\dot{E}_{ac}$, $\dot{E}_a$, and $\dot{E}_{ab}$. The vertical vector diagram shows the total voltage components $\dot{E}_{AB}$, $\dot{E}_{ab}$, and $\dot{E}_{ab}/6$.

$$(2.18)$$

$$u_{kp} = u_k * \sin \varphi_k \quad (2.19)$$

Коэффициент мощности короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = P_k / \sqrt{3} * U_k * I_k \quad (2.20)$$

Максимальное значение магнитного потока находится по формуле:

$$\Phi_m = B_m * Q_{ст} * k_c \quad (2.21)$$

где B_m – максимальное значение магнитной индукции в стержне магнитопровода,

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$Q_{ст}$ – площадь поперечного сечения магнитопровода,
 k_c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью.

КПД трансформатора при любой нагрузке определяется выражением:

$$\eta = \frac{\beta * S_H \cos \varphi_2}{\beta * S_H \cos \varphi_2 + P_{0H} + \beta^2 P_{KH}} \quad (2.21)$$

где P_{0H} – мощность холостого хода при номинальном напряжении,

P_{KH} – мощность КЗ при номинальных токах в обмотках трансформатора.

Электрические потери в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке можно определить, если известны значения активных сопротивлений и токов обмоток трансформатора:

$$P_{эм} = P_{э1} + P_{э2} = m I_1^2 r_1 + m_1 I_2^2 r_2 \quad (2.23)$$

Наибольший КПД соответствует коэффициенту нагрузки:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{KH}}} \quad (2.24)$$

Тогда формула для КПД принимает вид:

$$\eta_{\text{max}} = \frac{\beta' S_H \cos \varphi_2}{\beta' S_H \cos \varphi_2 + 2P_{0H}} \quad (2.25)$$

Пример 1. Дан масляный трансформатор ТМ-25/10 с номинальными параметрами: номинальной мощностью $S_{ном} = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А}$, номинальным напряжением $U_1 = 10 \text{ кВ}$, номинальным током первичной обмотки I_1 , напряжением КЗ $U_k\% = 4,5$ и его активными и реактивными параметрами U_{ka} и U_{kr} , мощности холостого хода и КЗ $P_0 = 0,13 \text{ кВт}$ и $P_K = 0,6 \text{ кВт}$, ток холостого хода $I_0\% = 3,2$, коэффициенты мощности холостого хода и КЗ $\cos \varphi_K$ и $\cos \varphi_X$, Сопротивление КЗ Z_K , и его активная и реактивная части r_K и x , его номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{ном}\%$ (индуктивный характер). Соединение трансформатора Y/Y. Определить неизвестные параметры трансформатора.

Решение:

- Номинальный ток в первичной обмотке

$$I_{1H} = \frac{S_H}{\sqrt{3} * U_{1H}} = \frac{25}{1,73 * 10} = 1,44 \text{ А}$$

- Ток холостого тока

$$I_0 = \frac{I_0}{I_{1H}} = \left(\frac{3,2}{100} \right) * 1,44 = 0,46 \text{ А}$$

- Коэффициент мощности Холостого тока

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} * U_1 * I_0} = \frac{0,13}{1,73 * 10 * 0,46} = 0,16$$

- Напряжение Короткого замыкания

Сертификат: 012000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$U_k = \frac{\left(\frac{U_k}{100}\right) U_{1H}}{\sqrt{3}} = \frac{\left(\frac{4.5}{100}\right) 10}{1.73} = 0.26 \text{ кВ}$$

- Коэффициент мощности Короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{3 I_{1H} * U_k} = \frac{0.6}{3 * 1.44 * 0.26} = 0.53$$

$$\sin \varphi_k = 0.85$$

- Активная и реактивная составляющие напряжения Короткого замыкания

$$U_{ка} = U_k \cos \varphi_k = 4,5 * 0,53 = 2,38\%$$

$$U_{кр} = U_k \sin \varphi_k = 4,5 * 0,85 = 3,8\%$$

- Сопротивление короткого замыкания

$$Z_k = \frac{U_k}{I_{1H}} = 0.26 * \frac{10^3}{1.44} = 180 \text{ Ом}$$

- Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_k = Z_k \cos \varphi_k = 180 * 0,53 = 95.4 \text{ Ом}$$

$$x_k = Z_k \sin \varphi_k = 180 * 0,85 = 153 \text{ Ом}$$

- Номинальное изменение напряжения трансформатора при сбросе нагрузки

$$\Delta U_{H\%} = U_{ка} \cos \varphi_2 + U_{кр} \sin \varphi_2 = 2,38 * 0,8 + 3,8 * 0,6 = 4,18\%$$

Пример 2. Технические данные трехфазного трансформатора ТМ-630/10: номинальная мощность $S_{ном}=630 \text{ кВ*А}$, номинальные первичное $U_{1H}=10\text{кВ}$ и вторичное $U_{2ном}=0,4\text{кВ}$ напряжения, напряжение короткого замыкания $U_k=5,5\%$ мощность короткого замыкания $P_{кз}=7,6 \text{ кВт}$ мощность холостого хода $P_{0H}=1,56 \text{ кВт}$, ток холостого хода $i_0=2,0$. Определить необходимые параметры и построить треугольник короткого замыкания (обмотки соединены Y/Y; параметры приведены к рабочей температуре).

Решение:

- Напряжение короткого замыкания

$$U_{1к} = U_k / 10^2 * U_{ном} = 5.5 / 10^2 * 10 * 10^3 = 550 \text{ В}$$

- Ток короткого замыкания

$$I_{1к} = I_{ном1} = S_{ном} / (\sqrt{3} * U_{1ном}) = \frac{630 * 10^3}{1,73 * 550} = 36,4 \text{ А}$$

- Коэффициент мощности режима короткого замыкания

$$\cos \varphi_k = \frac{P_{кз}}{\sqrt{3} U_{1H} * I_{к1}} = \frac{7600}{1,73 * 550 * 36,4} = 0,22$$

$$\varphi_k = 77^\circ; \sin \varphi_k = 0.97$$

- Полное сопротивление короткого замыкания

$$Z_K = \frac{U_K}{\sqrt{3}I_{1K}} = \frac{550}{\sqrt{3} * 36.4} = 8.7 \text{ Ом}$$

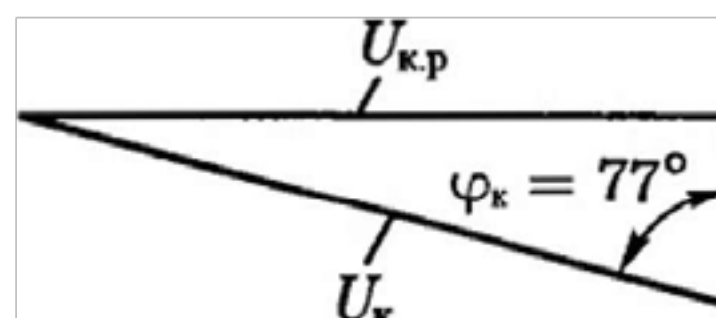
- Активная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$r_K = Z_K \cos \phi_K = 8.7 * 0.22 = 1.9 \text{ Ом}$$

- Индуктивная составляющая сопротивления короткого замыкания

$$x_K = Z_K \sin \phi_K = 8.7 * 0.97 = 8.44 \text{ Ом}$$

- Стороны треугольника напряжений короткого замыкания



$$U = I_K Z_K = 36.4 * 8.7 = 317 \text{ В}$$

$$U_{ка} = I_K r_K = 36.4 * 1.9 = 69 \text{ В}$$

$$U_{кр} = I_K x_K = 36.4 * 8.44 = 307 \text{ В}$$

- Принимаем масштаб напряжения $m_v = 5 \text{ В/мм}$, тогда длина векторов (сторон треугольника короткого замыкания):

$$U_K = \frac{317}{5} = 63 \text{ мм}$$

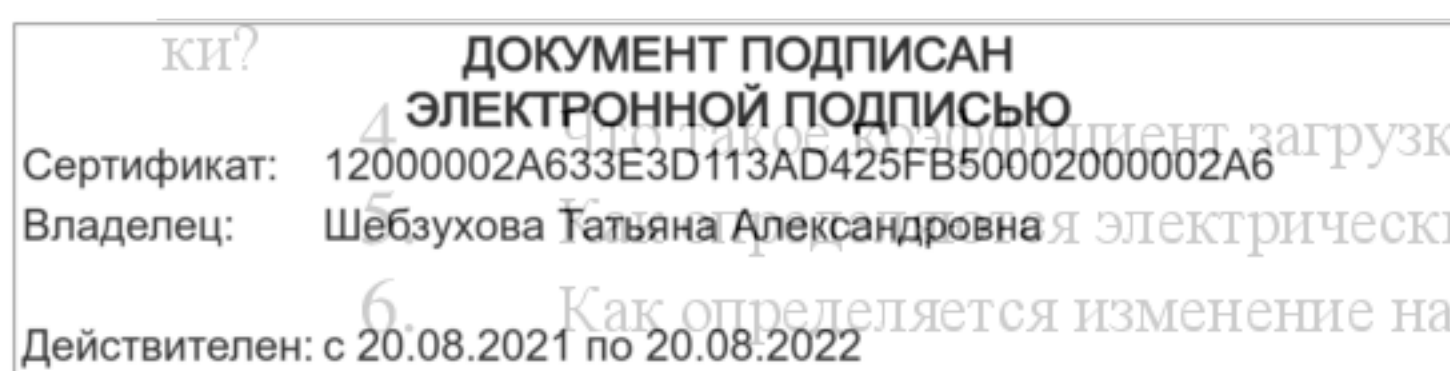
$$U_{ка} = \frac{69}{5} = 14 \text{ мм}$$

$$U_{кр} = \frac{307}{5} = 61 \text{ мм}$$

•

Контрольные вопросы и задания:

1. Что такое внешняя характеристика трансформатора?
2. Для чего делается приведение параметров вторичной обмотки трансформатора к первичной?
3. Изменяется ли магнитный поток трансформатора при изменении его нагрузки?



4. Как определяется коэффициент загрузки трансформатора?

5. Каковы электрические потери в трансформаторе?

6. Как определяется изменение напряжения трансформатора?

7. Какие потери в трансформаторе не зависят от его нагрузки?
8. Зависят ли от нагрузки электрические потери в трансформаторе?

Задачи

1. Трехфазный трансформатор имеет параметры, значения которых приведены в табл. 1.2.1: номинальная мощность $S_{ном}$ и номинальные напряжения (линейные) $U_{1ном}$ и $U_{2ном}$, напряжение короткого замыкания ток холостого хода U_0 , потери холостого хода $P_{ном}$ и потери короткого замыкания $P_{к1ном}$. Обмотки трансформатора соединены по схеме «звезда—звезда». Требуется определить: параметры Т-образной схемы замещения, считая ее симметричной ($z = r_2'$ и $x = x_2'$), а также фактические значения сопротивлений вторичной обмотки; величины КПД η , соответствующие значениям полной мощности трансформатора $0,25S_{ном}$; $0,5 S_{ном}$; $0,75 S_{ном}$ и при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 0,8$ (индуктивный характер нагрузки) и $\cos \varphi_2 = 1$; номинальное изменение напряжения ΔU . Построить графики $\eta = f(\beta)$ и $U_2 = f(\beta)$.

Таблица 2. 1– Исходные данные к задаче 1

Параметры	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$S_{н,кВ\cdot А}$	100	180	320	560	1000	800	600	700	400	200
$U_{1н, кВ}$	0,5	3,0	6,0	10	35	10	10	6,0	3,0	3,0
$U_{2н, кВ}$	0,23	0,4	0,4	0,4	3,0	0,4	0,6	0,6	0,23	0,23
$U_k, \%$	5,5	5,5	8,5	6,5	5,5	6,5	8,5	5,5	6,5	5,5
$I_0, \%$	6,5	5,5	5,5	5,5	5,0	5,0	5,5	5,5	5,5	6,5
$P_{0н, Вт}$	0,65	1,2	1,6	2,5	5,2	3,6	2,8	3,2	2,0	1,5
$P_{кном} > кВт$	2,0	3,6	5,8	9,0	13,5	10,0	9,0	8,2	6,0	4,0

2. В таблице 2.2 приведены данные трехфазных силовых трансформаторов серии ТМ: полная поминальная мощность S_n номинальные потери холостого хода $P_{0н}$ и короткого замыкания $P_{кн}$ коэффициент мощности нагрузки $\cos \varphi_2$. Требуется определить величину снижения КПД при номинальной нагрузке по сравнению с его максимальным значением.

Таблица 2.2 – Исходные данные к задаче 2

Тип трансформатора	$S_{ном} кВт$	$P_{0ном} кВт$	$P_{кном}, кВт$	$\cos \varphi_2$
ТМ-100/35	100	0,465	1,97	0,8
ТМ-160/35	160	0,70	2,65	0,85
ТМ-250/35	250	10	3,70	0,85
ТМ-400/35	400	1,35	5,50	0,8
ТМ-630/35	630	100	7,60	0,75
ТМ-1000/35	1000	2,75	12,2	0,70
ТМ-1600/35	1600	3,65	18,0	0,8
ТМ-2500/35	2500	5,10	25,0	0,75

ТМ-4000/35	4000	6,70	33,5	0,85
ТМСЭ00/35	6300	9,40	46,5	0,8

3. В таблице 2.3 приведены технические данные трехфазных трансформаторов серии ТСЗ (трансформатор трехфазный сухой с заземленным первичной обмоткой). Используя эти данные, определить: коэффициент трансформации k , номинальные значения токов первичной $I_{1ном}$ и $I_{2ном}$ вторичной обмоток; ток холостого хода $I_{0ном}$ напряжение короткого замыкания $U_{кз}$; сопротивление короткого замыкания Z_k и его активную r_k и индуктивную x_k , составляющие; определить номинальное изменение напряжения при значениях коэффициента мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1; 0,8(\text{инд.})$ и $0,8(\text{емк.})$; номинальные и максимальные значения КПД трансформатора при коэффициентах мощности нагрузки $\cos \varphi_2 = 1$ и $0,8$.

Таблица 2.3– Исходные данные к задаче 3

Тип трансформатора	$S_{ном}, \text{кВ}\cdot\text{А}$	$U_{1ном} \text{ В}$	$U_{2ном} \text{ В}$	$P_{0ном} \text{ кВт}$	$P_{кном} \text{ кВт}$	U_k	I_0
4.0	160	6	0,23	0,7	2,7	5,5	
4.0	160	10	0,4	0,7	2,7	5,5	
3,5	250	6	0,23	1,0	3,5	5,5	
3,5	250	10	0,4	1,0	3,5	5,5	
3,0	400	6	0,23	1,5	5,4	5,5	
3,0	400	10	0,4	1,0	5,4	5,5	
1,5	G30	6	0,4	2,0	7,5	5,5	
1,5	630	10	0,4	2,0	7,5	5,5	
1,5	1000	6	0,4	3,0	11,3	5,5	
1,5	1000	10	0,4	3,0	11,3	5,5	
1,5	1600	10	0,4	4,2	16,0	5,5	

4. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные: $S_H = 10500 \text{ кВА}$, $U_{1н}/U_{2н} = 110/6,3 \text{ кВ}$. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках $U_{1к} = 115 \text{ кВ}$, $P_{1к} = 81,5 \text{ кВт}$, Опыт проводится при температуре обмоток 75°C . Вычислить активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток трансформатора, полагая $R_k = R'_2$ и $X_k = X'_2$. Какое напряжение необходимо подвести к обмотке НН при проведении опыта со стороны этой обмотки?

5. Изменение вторичного напряжения трансформатора при номинальной нагрузке и $\cos \varphi_2 = 1$ составляет 1,97 %. Определить в абсолютных единицах электрические потери трансформатора, если $S_H = 100 \text{ кВА}$.

6. Определить изменение вторичного напряжения трансформатора в относительных единицах для нагрузки $I_2 = 0,5 I_{2н}$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$ по следующим данным: $S_H = 100 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $P_k = 1970 \text{ Вт}$, $u_k = 4,5 \%$.

7. Определить изменение вторичного напряжения трансформатора, имеющего номинальную мощность $S_H = 63 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, при нагрузке $I_2 = 0,5 I_{2н}$ и $\cos \varphi_2 = 0,8$ по следующим данным: $S_H = 63 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, $P_k = 1280 \text{ Вт}$, $u_k = 4,5 \%$. Найти значения угла нагрузки, при котором изменение вторичного напряжения не происходит.

7. ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

при холостом ходе $P_x = 265$ Вт, при коротком замыкании $P_k = 1280$ Вт. Определить КПД трансформатора для номинальной нагрузки при трех значениях коэффициента мощности $\cos\varphi_2 = 0,8; 1; (-0,8)$.

9. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_n = 25$ кВ·А; напряжение первичной обмотки $U_{1ном} = 10$ кВ; вторичной обмотки $U_{2ном} = 400$ В; потери при холостом ходе $P_x = 125$ Вт; сопротивление первичной обмотки $R_1 = 48,4$ Ом; вторичной обмотки $R_2 = 0,077$ Ом. Определить КПД трансформатора для значений $\beta = 0,5; 1; 1,25$ при коэффициенте мощности $\cos\varphi_2 = 0,9$.

10. Для однофазного трансформатора номинальной мощностью $S_{ном} = 600$ кВ·А и номинальным первичным напряжением $U_{ном} = 31,5$ кВ мощностью короткого замыкания $P_{кз} = 20$ кВт и напряжением короткого замыкания $U_k = 8,5\%$. Рассчитать данные и построить график зависимости изменения вторичного напряжения ΔU от коэффициента нагрузки β , если коэффициент мощности нагрузки $\cos\varphi_2$.

•

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• Практическое занятие №.3

Тема. Схемы и группы соединения трёхфазного трансформатора

Цель занятия. Изучить соединения трёхфазного трансформатора звездой и треугольником.

Теоретическая часть.

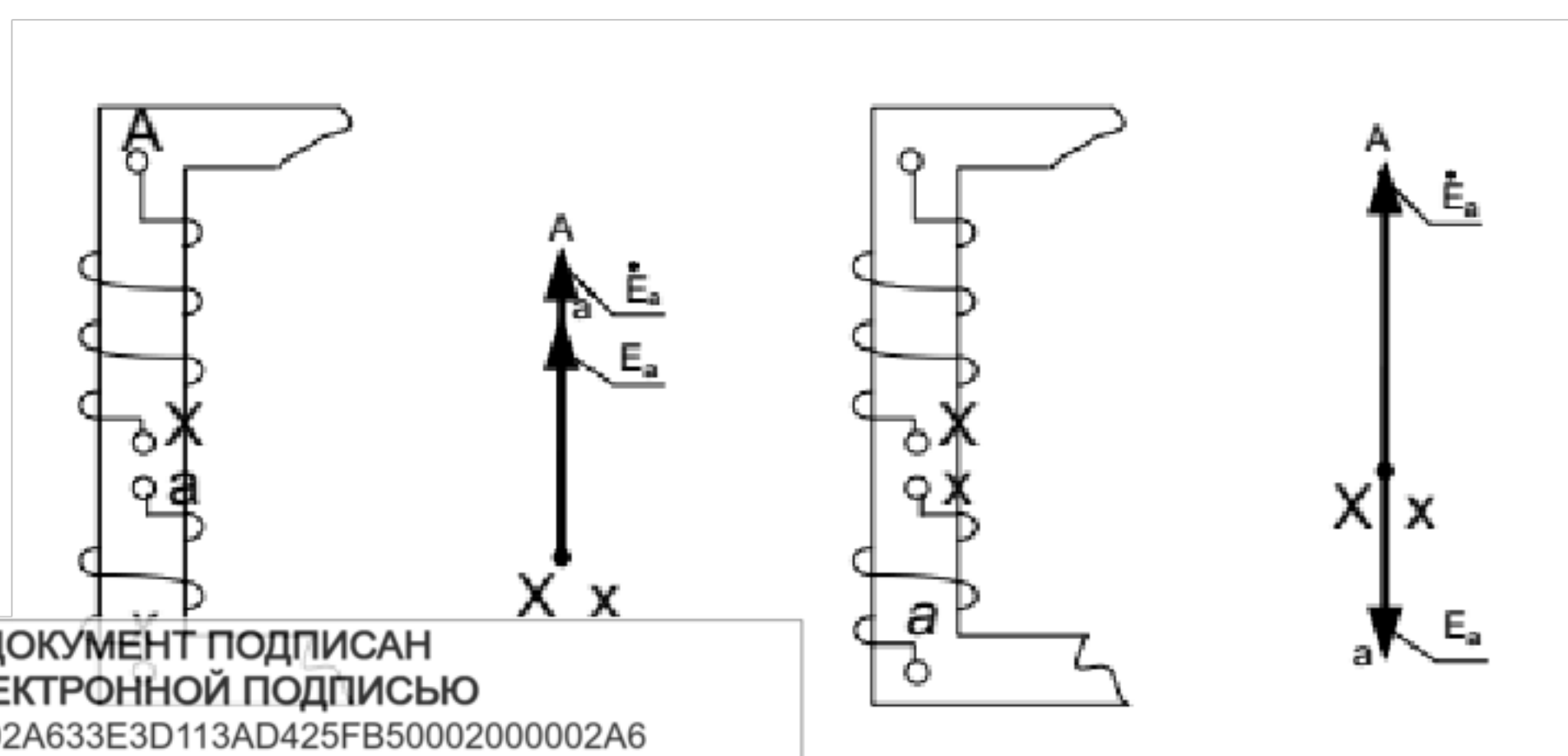
В отечественных трансформаторах приняты соединения обмоток: звезда, треугольник, зигзаг.

При соединении звезда Y концы обмоток образуют общую точку, а начала идут к сети. При соединении обмоток в треугольник Δ начало первой фазной обмотки присоединяют к концу второй, начало второй к концу третьей, начало третьей к концу первой, а вершины образовавшегося треугольника к сети. При соединении зигзаг каждая фаза вторичной обмотки располагается на двух различных стержнях.

Вообще говоря, понятия начала и конца обмоток условны, они необходимы для правильного соединения фазных обмоток. В трёхфазном трансформаторе положительному направлению тока от начала к концу обмотки должно соответствовать определённое направление потока в стержнях.

Начала фазных обмоток ВН обозначают обычно большими буквами А, В, С, их концы соответственно X, Y, Z, для обмоток НН эти обозначения соответственно а, b, с, и x, y, z. Если обмотка соединена звездой и у неё выведена нулевая точка, то применяют обозначение. 

При включении трансформатора на параллельную работу большое значение имеет способ соединения обмоток, который определяется группой соединения. Номер группы соответствует углу между векторами линейных напряжений обмоток ВН и НН, отсчитанному по часовой стрелке от вектора линейного напряжения обмотки ВН. За единицу углового перемещения принят угол 30° . Существует 12 групп соединения – от 0-й до 11-й. (Раньше нулевая группа называлась 12).



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 3.1 – Группы соединений однофазного трансформатора

Методика определения групп трансформаторов.

Рассмотрим одну фазу трёхфазного трансформатора. Если обмотки низкого и высокого напряжения намотаны в одну сторону, то есть или по левой или по правой винтовой линии, верхние зажимы обмоток принять за их начала, а нижние за их концы, то ЭДС (векторы) индуцируемые в обмотках, во-первых, параллельны, т.к. индуцируются одним и тем же потоком, а во-вторых, направлены в одну сторону. Если зажимы обмотки НН перемаркировать, то E_A и E_a будут направлены параллельно, но встречно. При построении ВД, необходимой для определения группы, следует также учитывать, что, если на схеме концы обмоток соединены в одной точке, то и на векторной диаграмме соответствующие точки векторов фазных напряжений, обозначенных теми же буквами, также соединены вместе.

Обычно векторы линейных ЭДС обмоток уподобляют стрелкам часового циферблата, причём вектор ВН принимают за минутную стрелку, установленную на цифре 12, а вектор НН – за часовую стрелку, и цифра, на которую указывает часовая стрелка, определяет группу трансформатора. Пусть трёхфазный трансформатор имеет соединение обмоток ВН и НН в звезду. При этом:

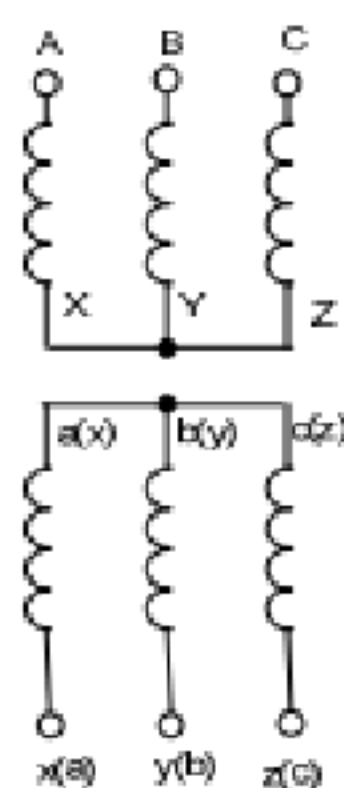


Рисунок 3.2 – Трёхфазный трансформатор со схемой соединения звезда

- 1) обмотки НН и ВН имеют одинаковую намотку;
- 2) начала и концы обмоток расположены одинаково;
- 3) одноимённые обмотки расположены на общих стержнях (например А и а, В и в).

Построим теперь ВД фазных и линейных ЭДС обмоток ВН и НН.

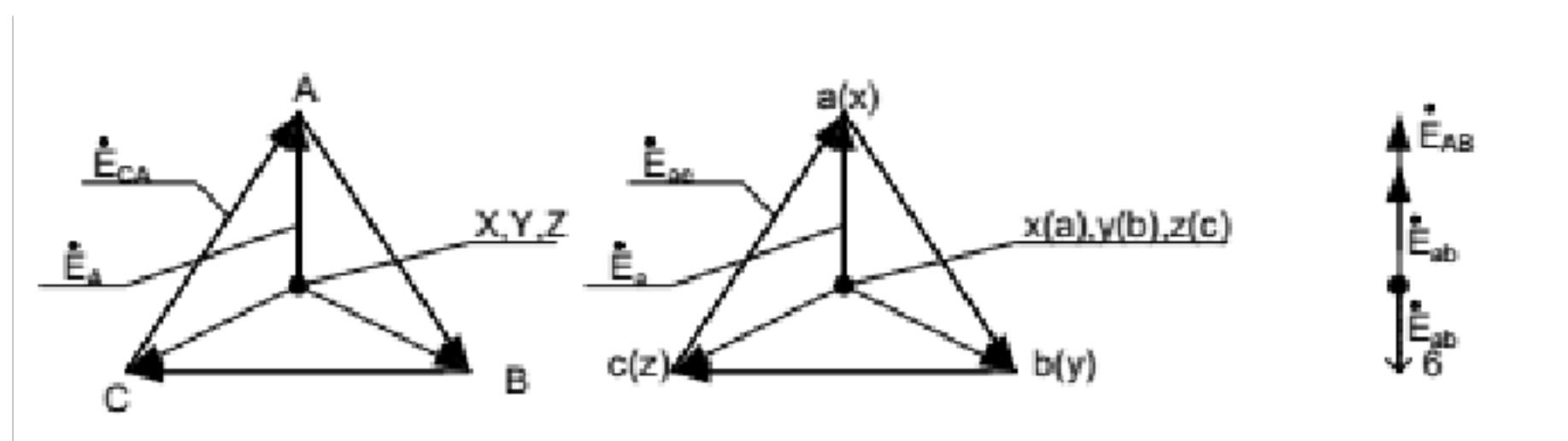


Рисунок 3.3 – Трехфазный трансформатор с группой соединений Y/Y-0

При этом одноимённые векторы ЭДС совпадают по фазе, и если $\vec{E}_{AB}$ совместимость на циферблате с цифрой 12, то «часовая стрелка» $\vec{E}_{ab}$ покажет 12 или 0 «часов».

Если теперь в схеме Y/Y поменять местами начала и концы обмоток НН, то в ВД НН вектор поменяет направление на противоположное, и «часы» будут показывать 6-ю группу. При круговой перемаркировке фаз обмотки НН можно получить группы 4 и 8, поменяв местами начала и концы: 2 и 6, т.е. все чётные группы. Чётные группы получают также при соединении Δ / Δ , а нечётные - Δ / Y и Y / Δ .

Рассмотрим теперь соединение Y/ Δ .

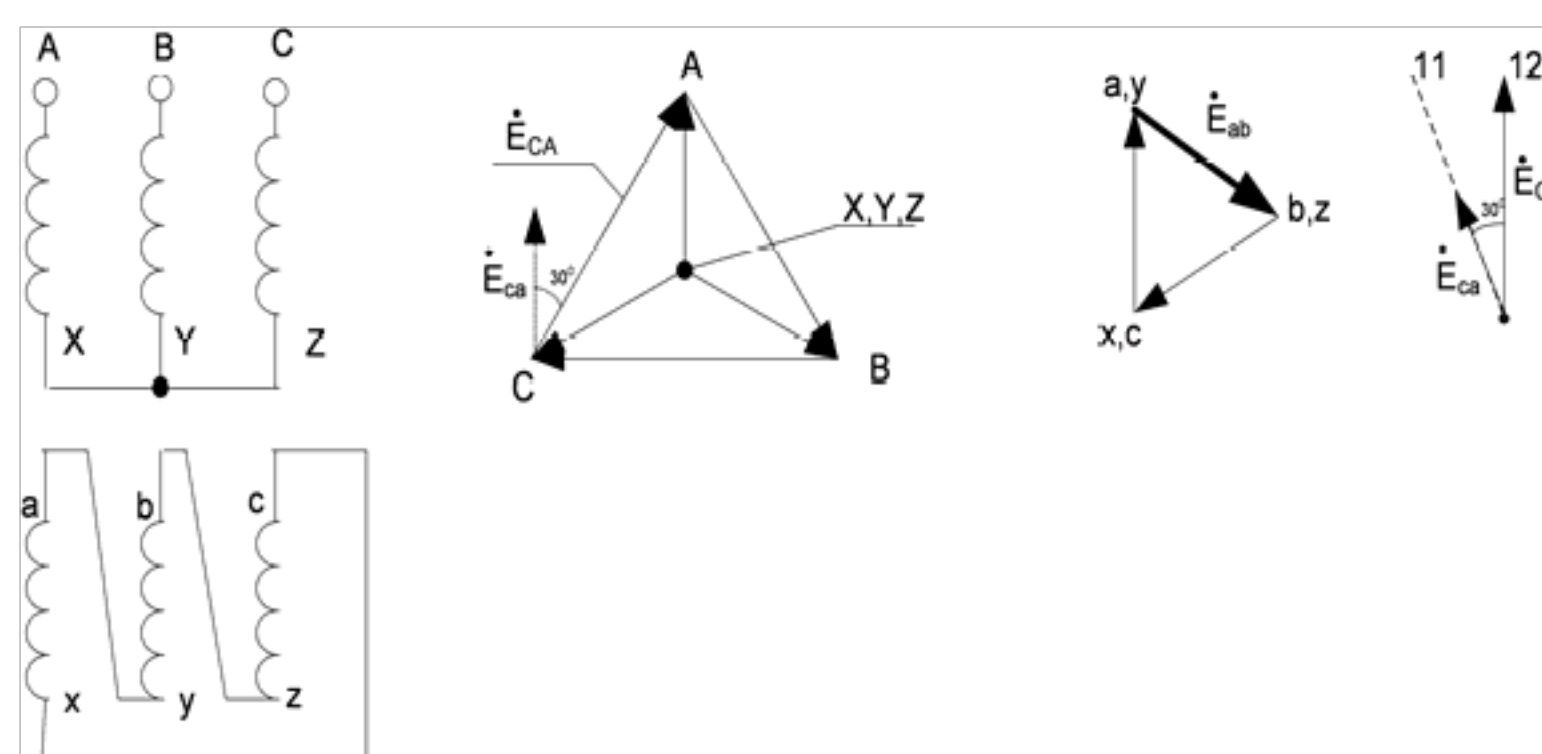


Рисунок 3.4 – Трехфазный трансформатор со схемой и группой соединений Y/-11

Из рисунка видно, что вектор линейной ЭДС НН смещен на 30° по отношению к вектору ВН и расположится напротив цифры 11. Перемаркировкой зажимов можно получить группы 1, 3, 5, 7 и 9. Чтобы обеспечить параллельную работу трансформаторов в РФ изготавливаются трансформаторы: Y/Y₀-0; Δ / Y_0 -11, Y₀ / Δ -11, Y / Δ -11; слева от дроби – ВН; справа НН; «0» – вывод наружу нулевой точки. Y/Y₀-0 – применяют на 10/0,4 и 6/0,4 кВ, при неравномерной нагрузке фаз: Y / Δ -11; 35/10 кВ и 35/6 - Y / Δ -11, при $U_{ЛН} > 110$ кВ – Y₀ / Δ -11.

С точки зрения влияния высших гармоник и поведения при несимметричной нагрузке целесообразно одну из обмоток соединить в треугольник, т. к. при этом исчезают высшие гармоники, кратные трём.

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Контрольные вопросы и задания

Какие группы соединения обмоток трансформатора Вы знаете

2. Что такое группа соединения трансформатора?
3. Для Чего необходимо знать группу соединения трансформатора?
4. Как определяется группа соединения трансформатора?

Задачи

1. Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом.

2.2 Задания для решения.

Задача 2.1

Определить группу трансформатора в соответствии с вариантом.

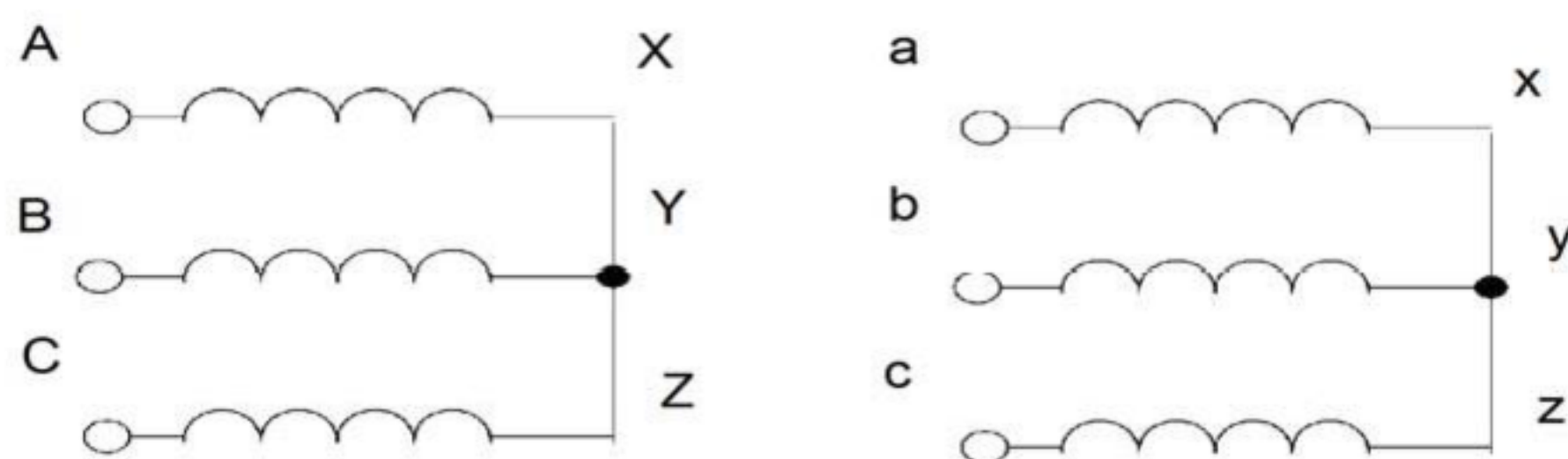


Рисунок 2.5 – Вариант 1

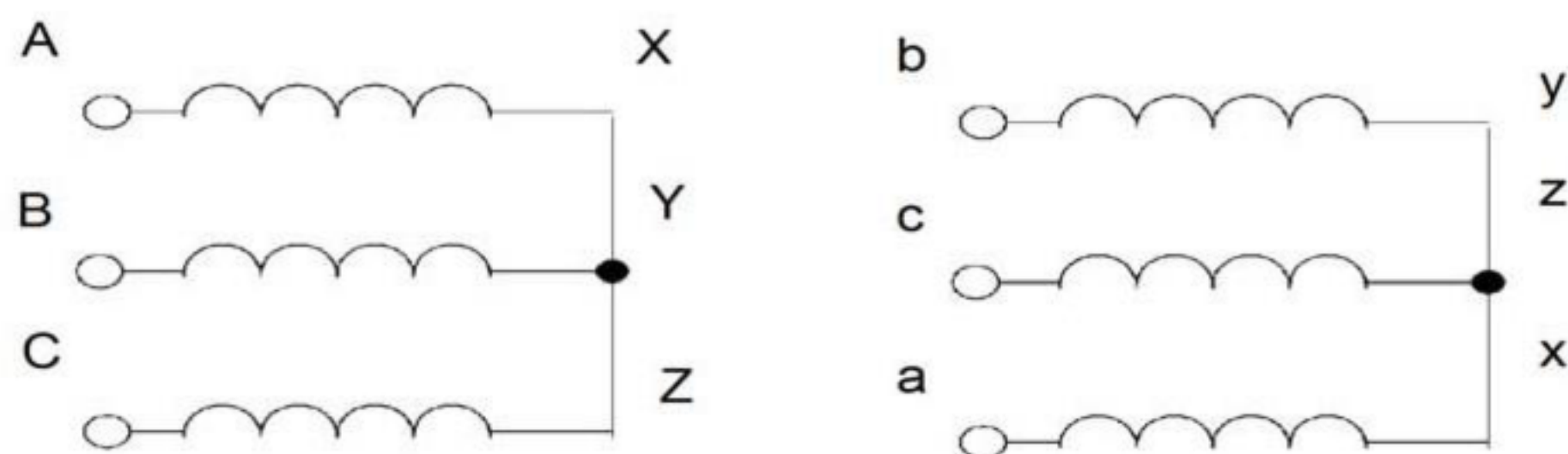
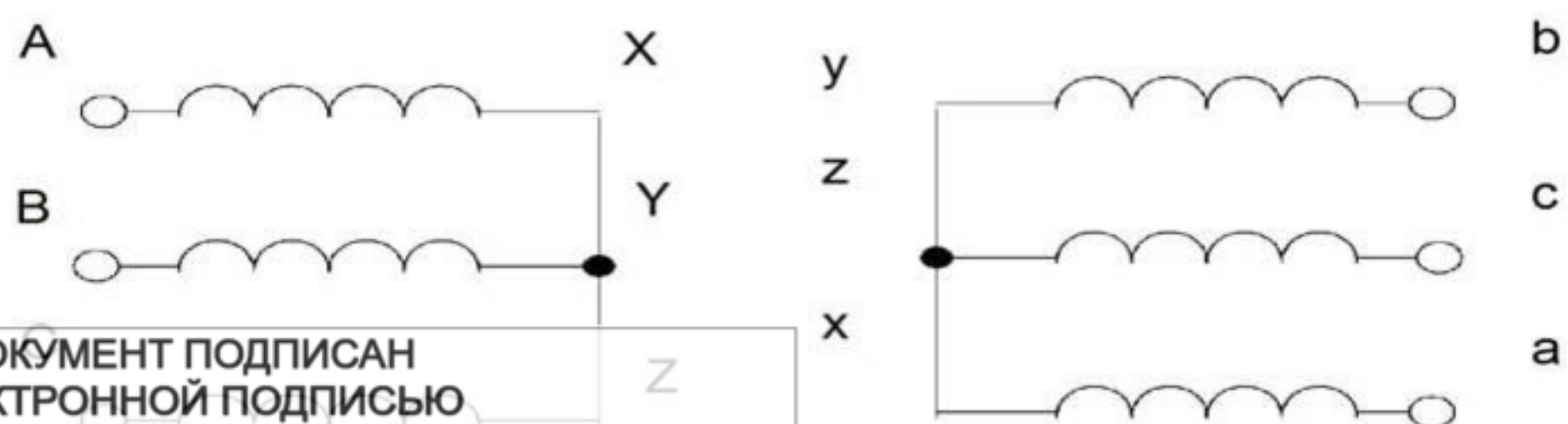


Рисунок 2.6 – Вариант 2



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 2.7– Вариант 3

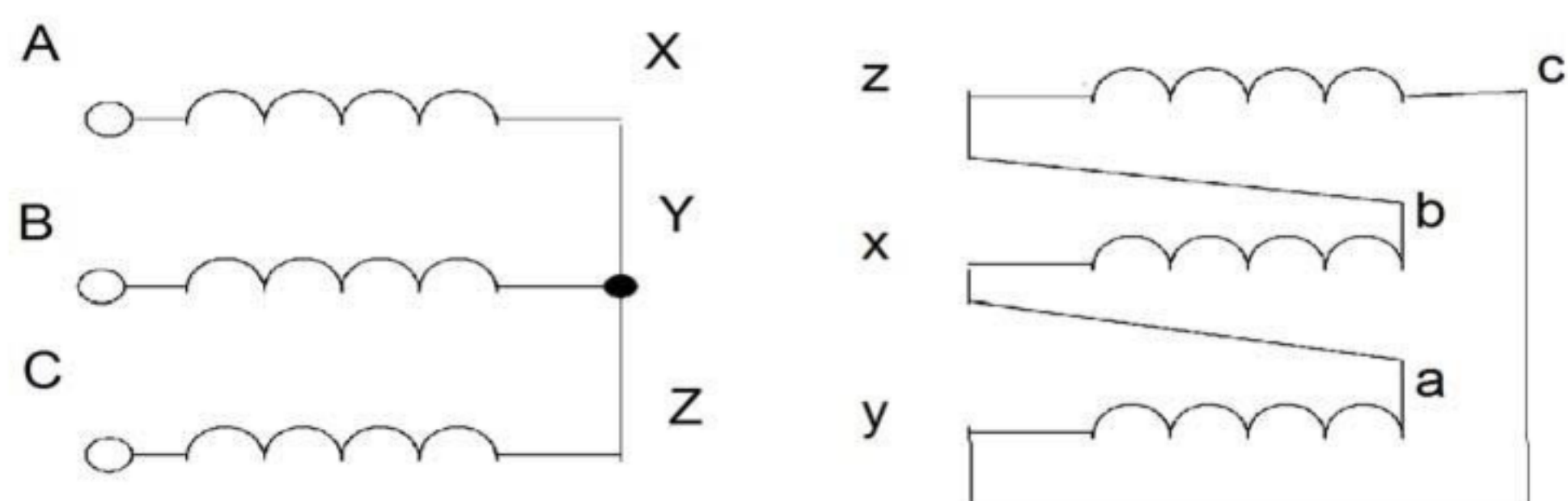


Рисунок 2.8 – Вариант 4

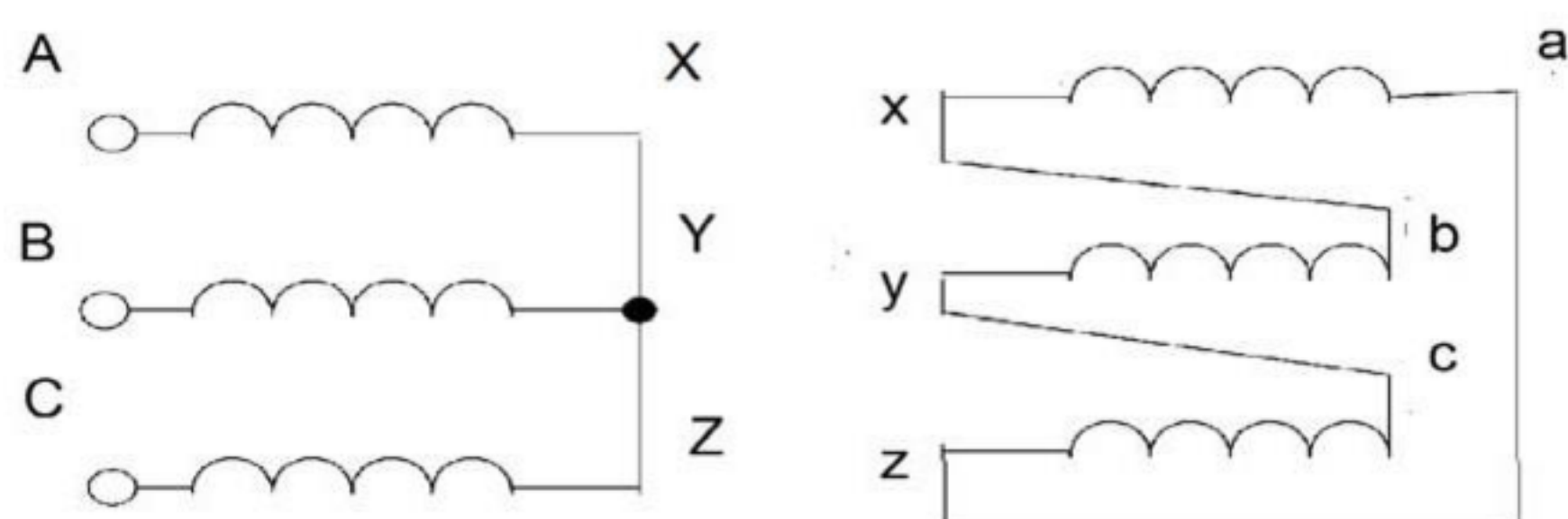


Рисунок 2.9 – Вариант 5

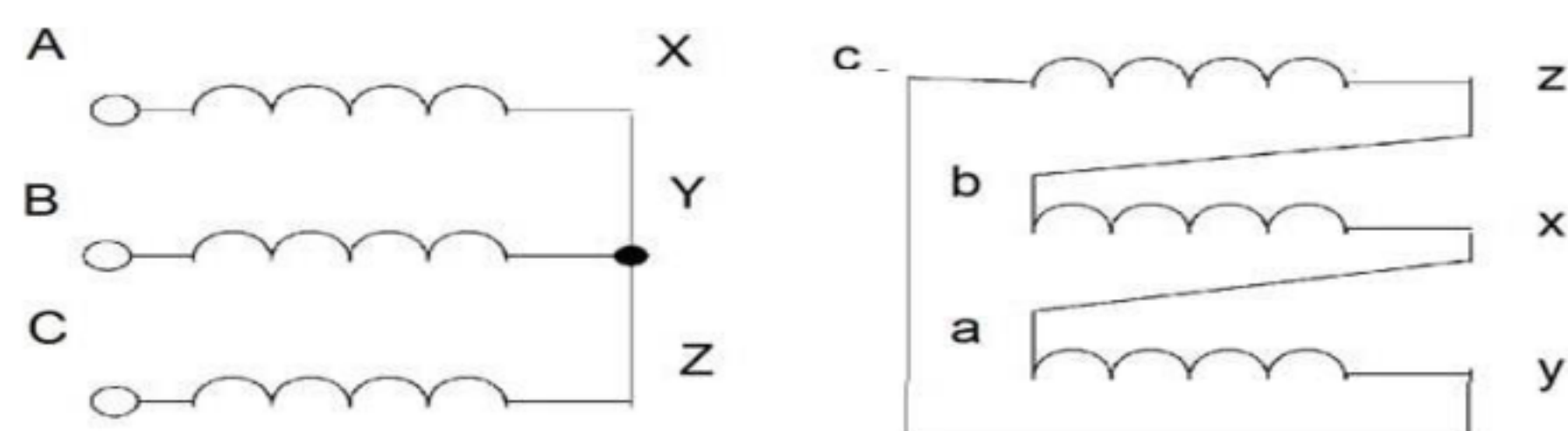


Рисунок 2.10 – Вариант 6

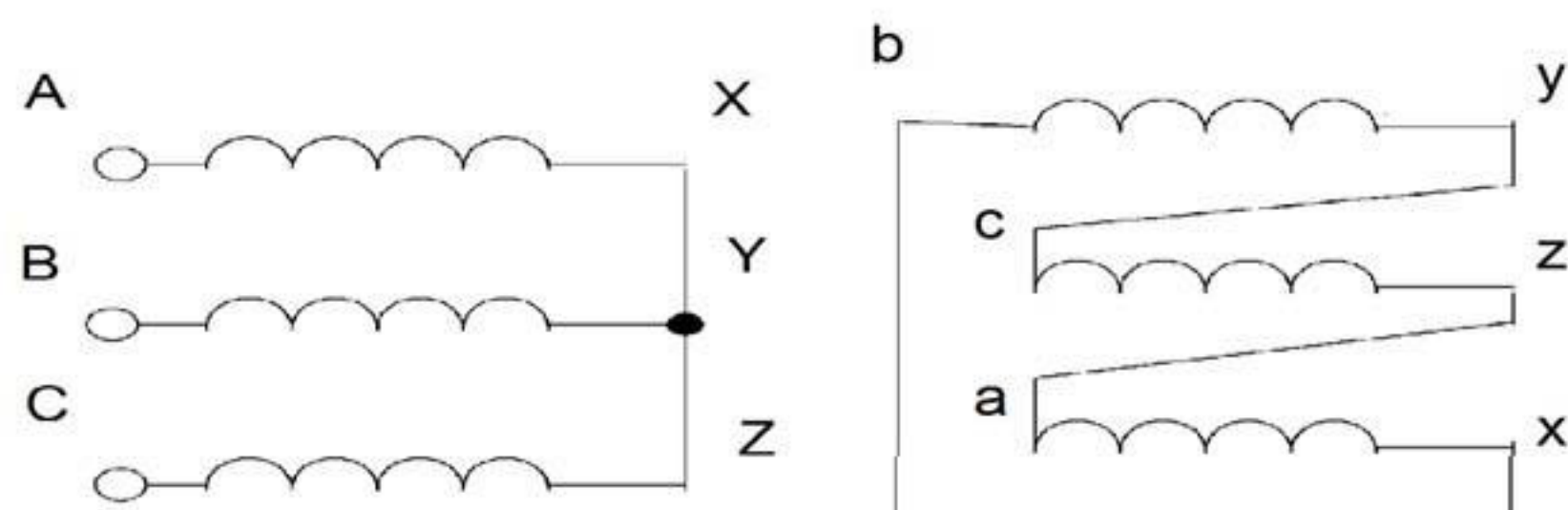


Рисунок 2.11 – Вариант 7

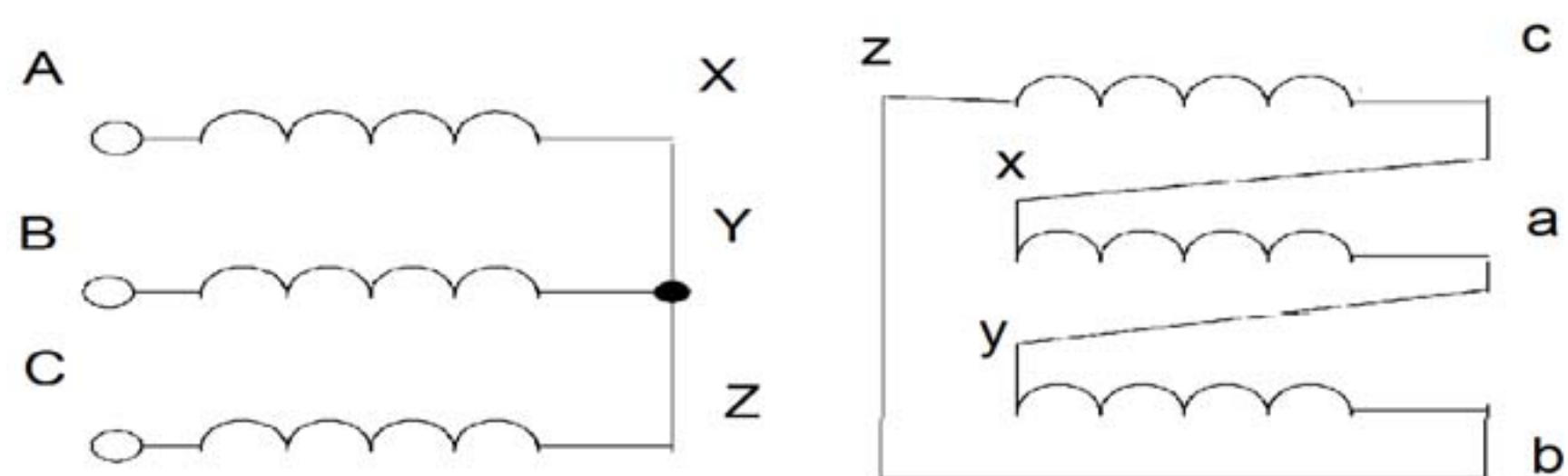


Рисунок 2.12 – Вариант 8

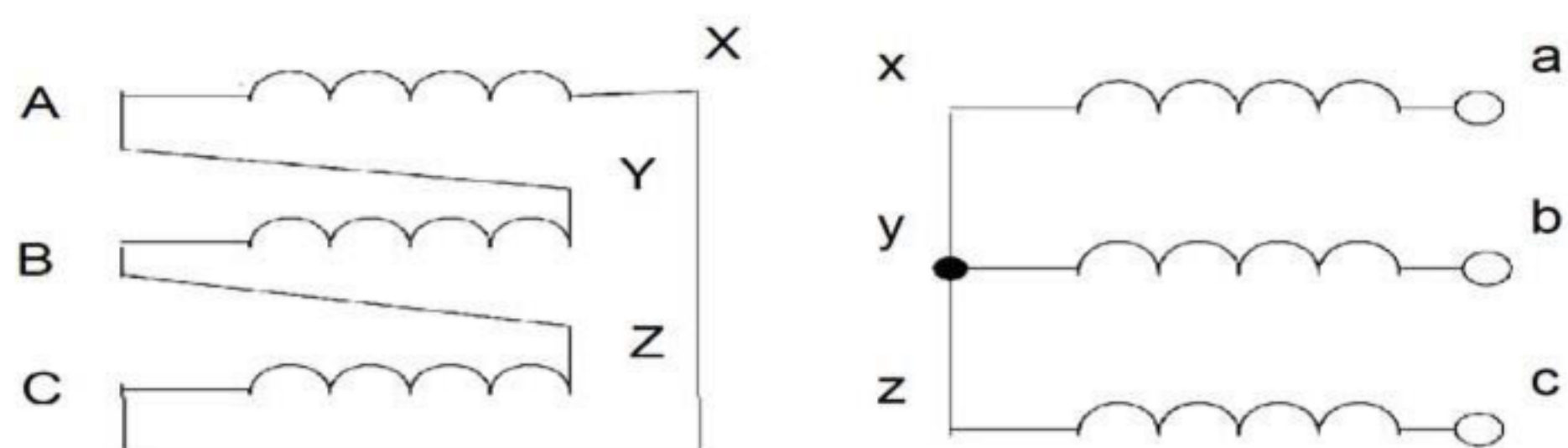


Рисунок 2.13 – Вариант 9

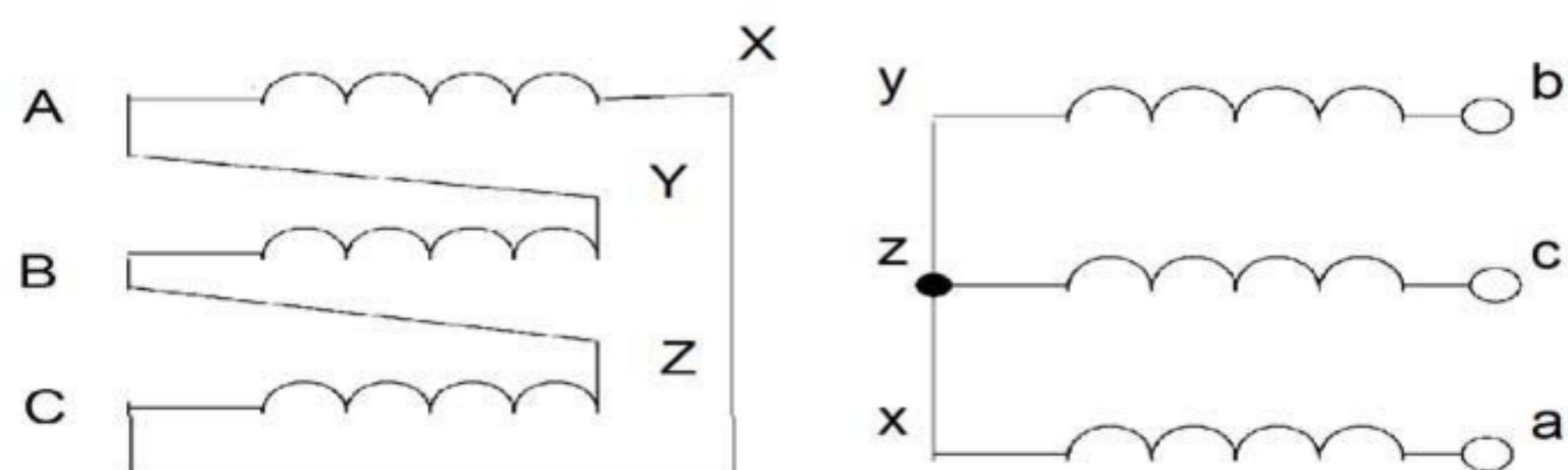


Рисунок 2.14 – Вариант 10

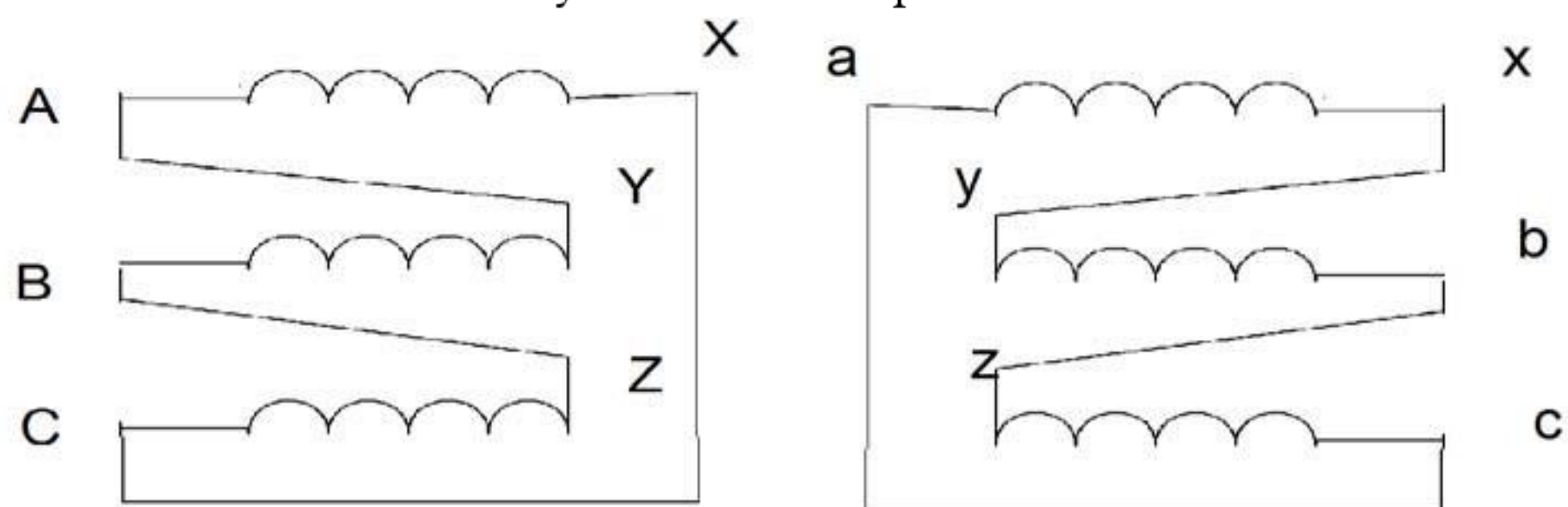


Рисунок 2.15 – Вариант 11

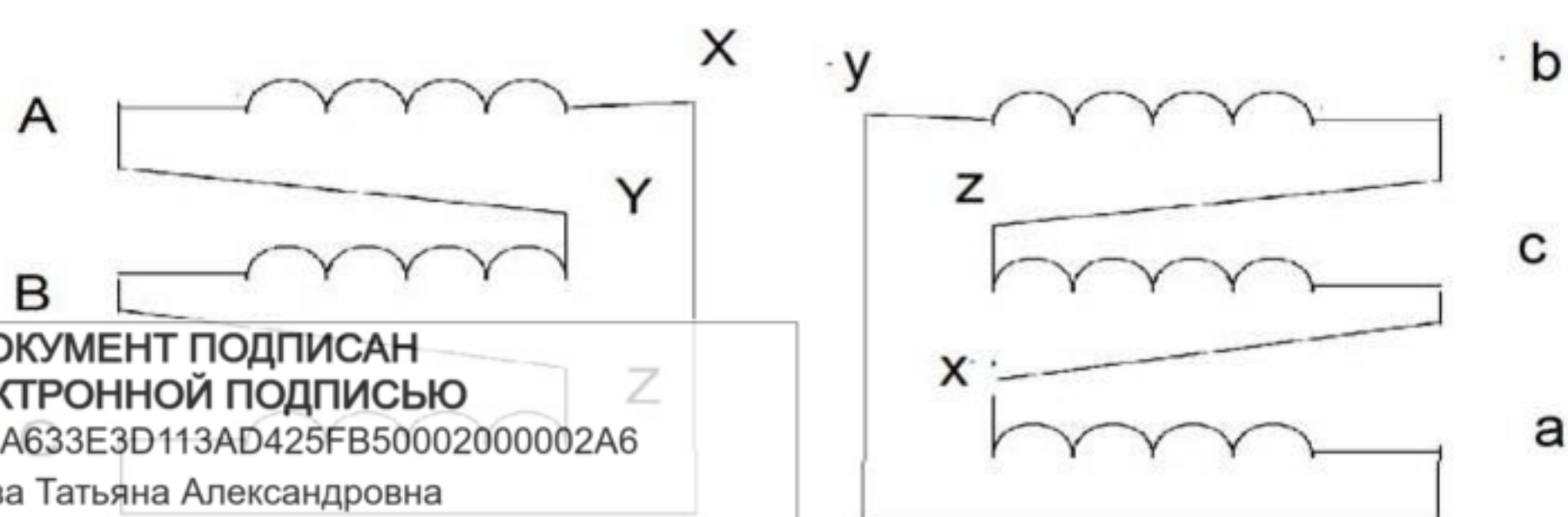


Рисунок 2.16 – Вариант 12

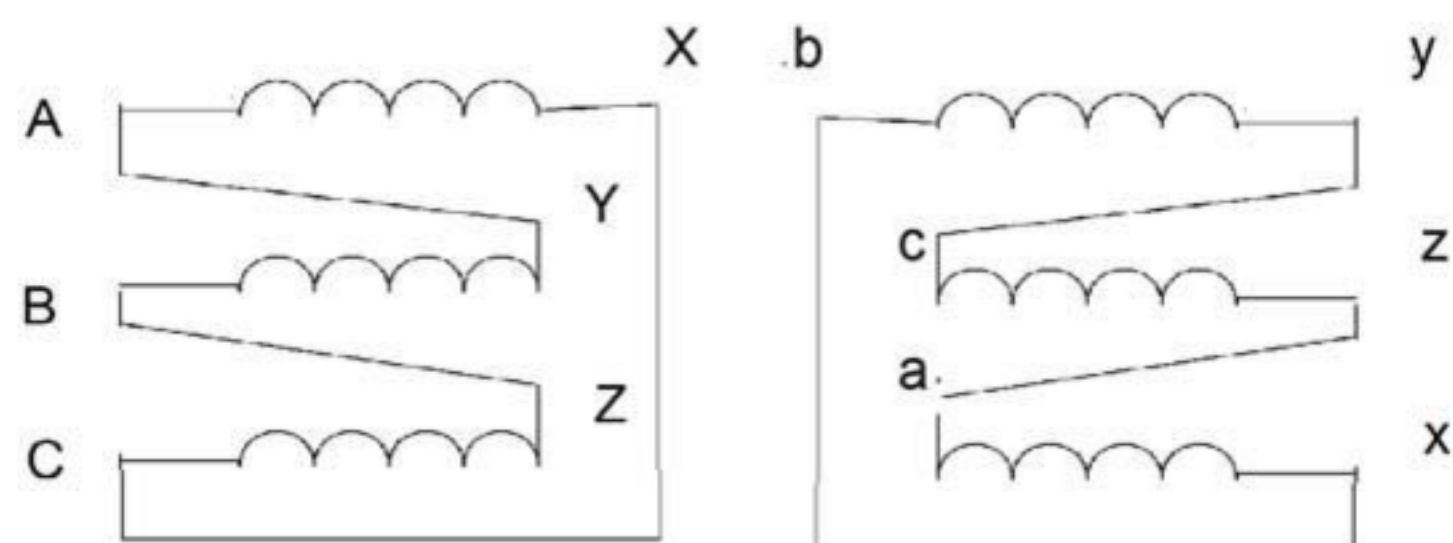


Рисунок 2.17 – Вариант 13

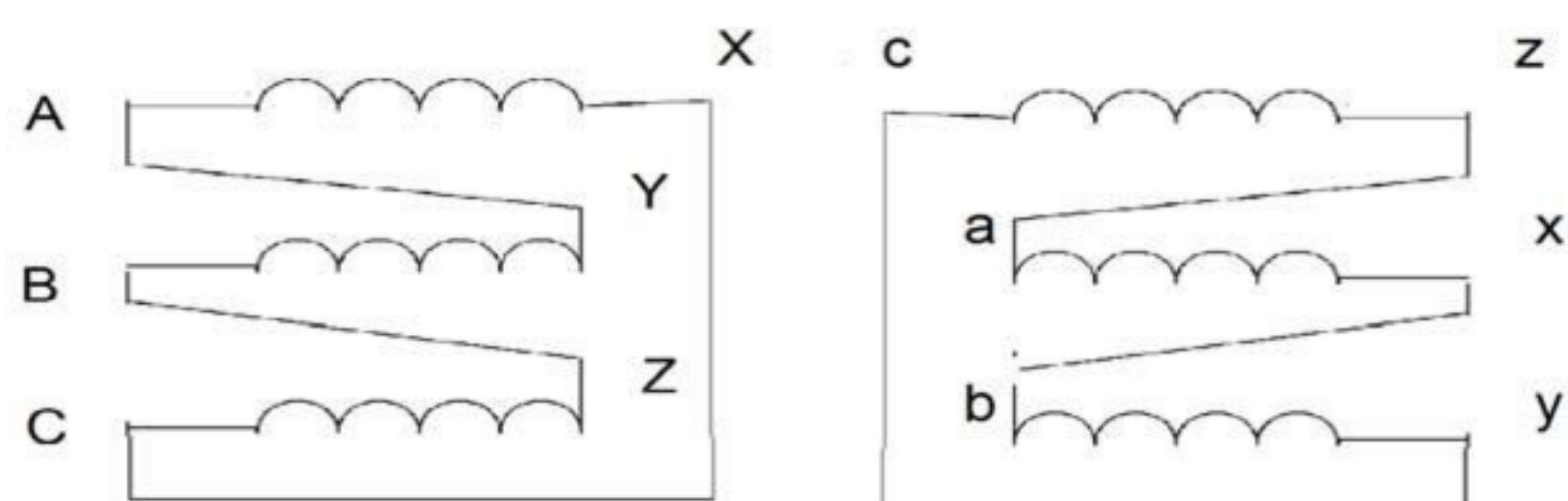


Рисунок 2.18 – Вариант 14

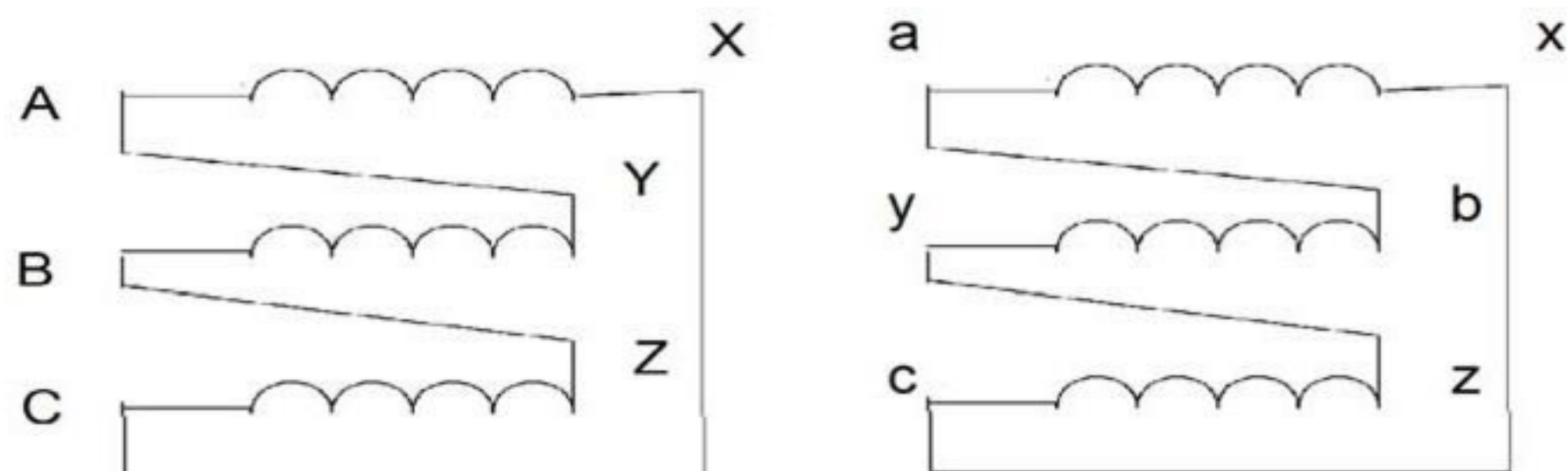


Рисунок 2.19 – Вариант 15

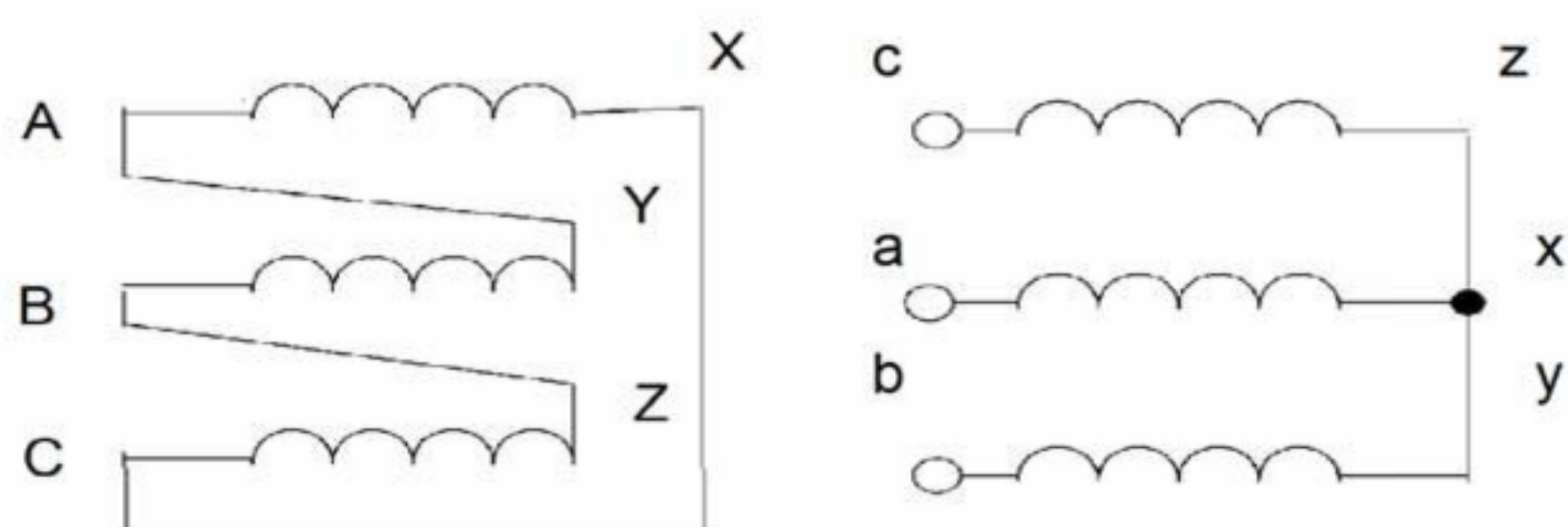


Рисунок 2.20 – Вариант 16

• Практическое занятие №.4

Тема. Трансформация трехфазных токов

Цель занятия. Изучение трансформации токов в трёхфазной системе

Теоретическая часть.

Трансформация трехфазных токов и напряжений осуществляется с помощью группы из трех однофазных трансформаторов или с помощью трехфазного двухобмоточного трансформатора со стержневым или броневым магнитопроводом.

Обмотки отдельных фаз соединяются в звезду – Y или треугольник – Δ .

Напряжения и токи обмоток трехфазного трансформатора: при симметричных первичных линейных напряжениях:

$$\dot{U}_{AB} = U_{1л}; \dot{U}_{BC} = U_{1л} e^{-j(2\pi/3)}; \dot{U}_{CA} = U_{1л} e^{j(2\pi/3)} \quad (4.1)$$

и симметричных сопротивлениях нагрузки фазные токи и напряжения трансформатора получаются симметричными.

Фазные напряжения и токи трансформатора при соединении в звезду и зигзаг:

$$U_{\phi} = U_{л}/\sqrt{3}; I_{\phi} = I_{л} \quad (4.2)$$

при соединении в треугольник:

$$U_{\phi} = U_{л}; I_{\phi} = I_{л}/\sqrt{3} \quad (4.3)$$

• Контрольные вопросы и задания

1. Как определить фазные напряжения и токи при соединении обмотки трансформатора по схеме «звезда»?
2. Как определены фазные напряжения и токи при соединении обмотки трансформатора по схеме «треугольник»?
3. Что собой представляет групповой трансформатор?

• Задачи

1. Группа из трех однофазных трансформаторов одинаковой мощности с номинальными фазными напряжениями $U_{1ф} = 500$ кВ и $U_{2ф} = 20$ кВ используется для трансформации. Первичные обмотки соединены в треугольник, вторичные – в звезду. чему равны линейные напряжения на обмотках трансформатора? Найти коэффициент трансформации.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

2. Напряжение трехфазной сети высокого напряжения $U_{1c} = 525$ кВ, низкого – $U_{2c} = 20$ кВ. При каком соединении обмоток трех однофазных трансформаторов с номинальными напряжениями $U_{1н}/U_{2н} = 303/20$ кВ возможна трансформация трехфазных токов?

3. Обмотки трехфазного трансформатора соединены по схеме Y/–, число витков каждой фазы первичной обмотки $W_1 = 1000$, вторичной обмотки $W_2 = 200$. Определить линейное напряжение на выходе трансформатора, если линейное напряжение питающей сети $U_1 = 1000$ В.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- **Практическое занятие №.5**

Тема. Экспериментальное определение параметров и потерь трансформатора

Цель занятия: Научиться рассчитывать параметры трансформатора и определять потери.

Теоретическая часть.

В процессе опыта холостого хода трансформатора фиксируется $U_{1(2)0}$, P_0 , I_{10} . По данным опыта рассчитывают сопротивления:

$$Z_0 = \frac{U_{10}}{\sqrt{3}I_{10}} \quad (5.1)$$

$$r_0 = \frac{P_0}{3I_{10}^2} \quad (5.2)$$

$$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2} \quad (5.3)$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3} U_{10} I_{10}} \quad (5.4)$$

В опыте короткого замыкания трансформатора к первичной обмотке подводят меньшее (по сравнению с номинальным) напряжение так, чтобы ток $I_{к1}$ был в пределах номинальных значений.

Так же, как и в предыдущем случае рассчитываются P_k , Z_k , r_k , и x_k .

Схема замещения трансформатора в режиме короткого замыкания имеет вид, показанный на рисунке 5.1.

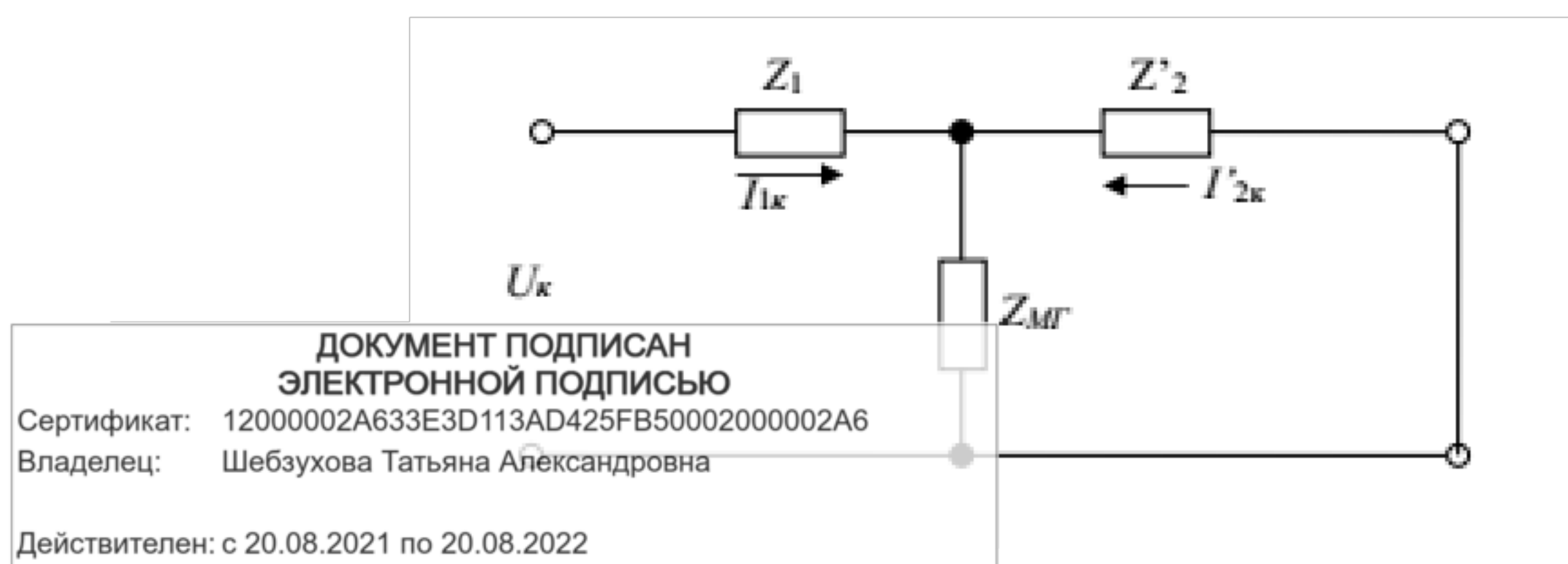


Рисунок 5.1 –Схема замещения трансформатора в режиме к.з.

Общее сопротивление схемы:

$$Z_{\kappa} = Z_1 + \frac{Z_{\text{МГ}} * Z_2'}{Z_{\text{МГ}} + Z_2'} \quad (5.5)$$

так как $Z_{\text{МГ}} \gg Z_2'$, то в знаменателе членом Z_2' можно пренебречь, тогда:

$$Z_{\kappa} \approx Z_1 + Z_2' \quad (5.6)$$

т.е. упрощенная схема замещения имеет вид:

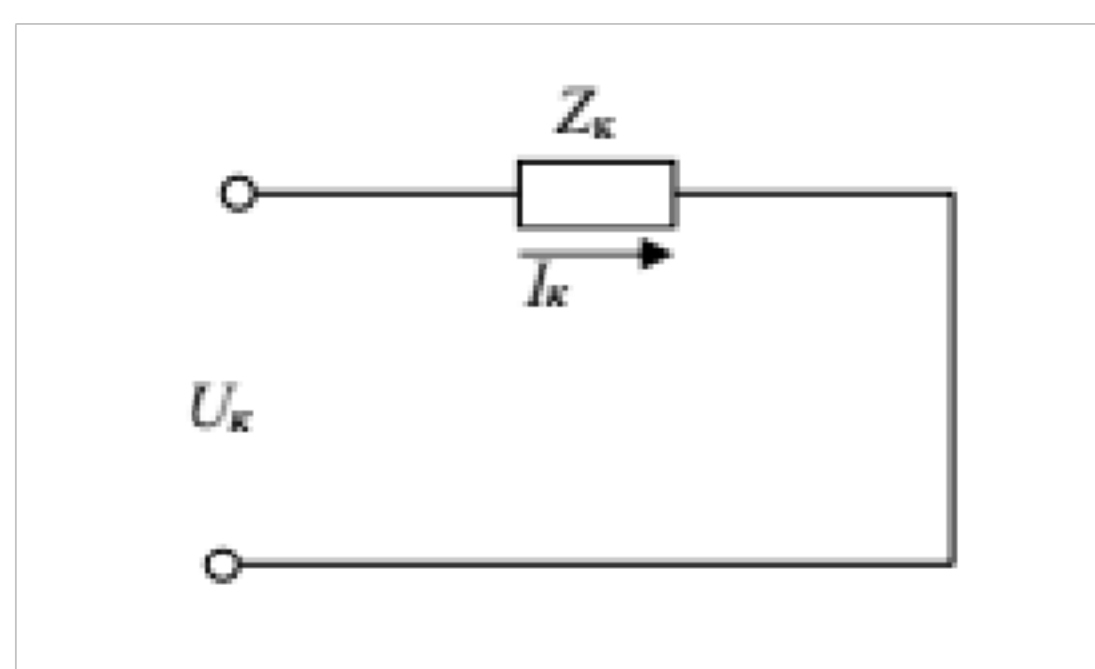


Рисунок 5.2 –Упрощенная схема замещения трансформатора в режиме к.з.

Напряжение U_{κ} , при котором ток короткого замыкания равен номинальному $I_{\kappa} = I_N$, называется напряжением короткого замыкания.

В относительных единицах:

$$U_{\kappa}^* = \frac{I_N Z_{\kappa}}{U_N} = Z_{\kappa}^* \quad (5.7)$$

Величина U_{κ} обычно выражается в паспортной табличке трансформатора. U_{κ} можно определить из векторной диаграммы в режиме короткого замыкания:

Составляющим напряжения короткого замыкания:

$$U_{\kappa \text{ а}} = U_{\kappa} * \cos \varphi_{\kappa} \quad (5.8)$$

$$U_{\kappa \text{ в}} = U_{\kappa} * \sin \varphi_{\kappa} \quad (5.9)$$

Пример 1.

Номинальные данные трехфазного трансформатора при соединении обмоток по

схеме «звезда-треугольник» мощность $S_N = 63$ кВА, напряжение на обмотке высокого и низкого напряжения $U_{\text{ВН}} = 21$ кВ и $U_{\text{НН}} = 0,4$ кВ. Потери холостого хода – $P_0 = 0,29$ Вт, потери короткого замыкания – $P_K = 1,65$ кВт, коэффициент трансформации $k = 52,5$, активная составляющая напряжения короткого замыкания – $U_K = 4,5$ %, реактивная составляющая напряжения короткого замыкания – $U_{\text{кр}} = 1,5$ %.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

роткого замыкания – $U_{ка} = 2,54 \%$. Определить: коэффициент мощности при коротком замыкании и холостом ходе, сопротивления схемы замещения для режима короткого замыкания, КПД при номинальной нагрузке и коэффициентах мощности $\cos \varphi_2 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0.8$; активную мощность на вторичной стороне для $\cos \varphi_2 = 0.8$, при которой значение КПД будет наибольшим; потери в трансформаторе при мощности $S = 10 \text{ кВ}\cdot\text{А}$; напряжение на выводах вторичной обмотки при номинальной нагрузке и коэффициентах мощности $\cos \varphi_1 = 1$ и $\cos \varphi_2 = 0.8$.

Решение:

Номинальные токи, А:

$$I_{1н} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{вн}} = \frac{63 * 10^3}{\sqrt{3} * 21 * 10^3} = 1.73$$

$$I_{2н} = \frac{U_{вн}}{U_{нн}} * I_{1н} = \frac{63 * 10^3}{\sqrt{3} * 21 * 10^3} = 91$$

Коэффициенты мощности, о.е.:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{вн}I_0} = \frac{0.29}{\sqrt{3} * 21 * (0.035 * 1.73)} = 0.132$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3}U_k I_{1н}} = \frac{1.65}{\sqrt{3} * 21 * (0.045 * 1.73)} = 0.592$$

Сопротивления короткого замыкания, Ом:

$$r_k = r_1 + r'_2 = \frac{P_k}{3I_{1н}^2} = \frac{1650}{3(1.73)^2} = 183$$

$$x_k = x_1 + x'_2 = \frac{U_{кр} [\%] * (U_{1н} / \sqrt{3})}{100I_{1н}} = \frac{\sqrt{U_k^2 - U_{ка}^2} * U_{1н}}{100\sqrt{3}I_{1н}} = \frac{\sqrt{(4.5)^2 - (2.54)^2} * 21000}{100\sqrt{3} * 1.73} = 260$$

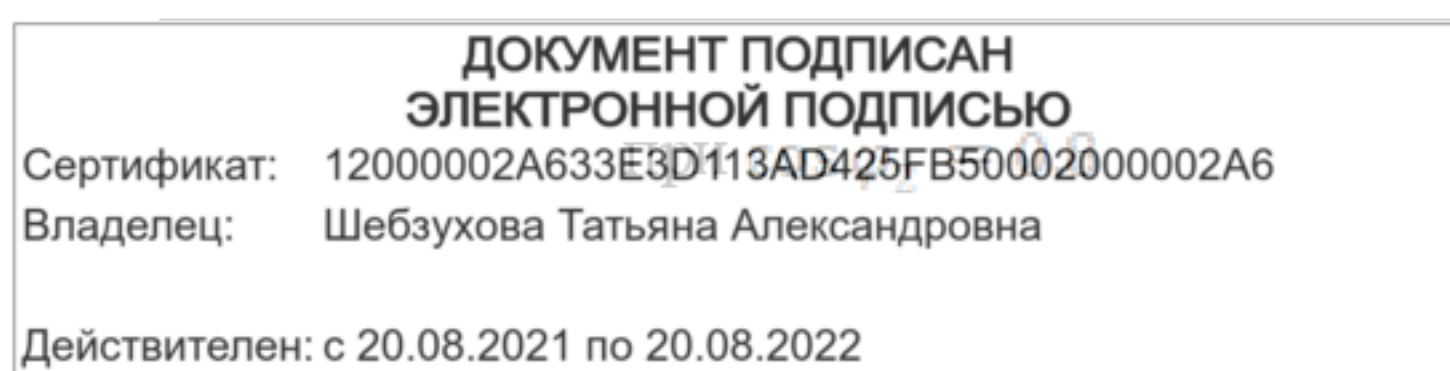
Коэффициент полезного действия при номинальной нагрузке, о.е.:

$$\eta_n = \frac{P_{2н}}{P_{1н}} = \frac{S_n \cos \varphi_2}{S_n \cos \varphi_2 + P_0 + P_k}$$

при $\cos \varphi_2 = 1$

$$\eta_n = \frac{63 * 1}{63 * 1 + 0.29 + 1.65} = 0.97$$

$$\eta_n = \frac{63 * 0.8}{63 * 0.8 + 0.29 + 1.65} = 0.963$$



Максимальное значение коэффициента полезного действия соответствует условию $P_o = P_k$. Учитывая, что потери короткого замыкания $P_k = 3I_{1\varphi}^2 r_k$, определяются значения тока

$$I_1 = \sqrt{\frac{P_k}{3r_k}} = \sqrt{\frac{P_o}{3r_k}} = \sqrt{\frac{290}{3 \cdot 183}} = 0,727 \text{ A}$$

и активной мощности на вторичной стороне

$$P_2 = \sqrt{3} U_{2\text{н}} I_2 \cos \varphi_2 = \sqrt{3} U_{2\text{н}} \left(\frac{U_{1\text{н}}}{U_{2\text{н}}} \right) I_1 \cos \varphi_2 = \sqrt{3} \cdot 400 \cdot \left(\frac{21000}{400} \right) 0,927 \cdot 0,8 = 16,9 \text{ кВт}$$

Потери мощности в трансформаторе при $S = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$:

$$\Sigma \Delta P = P_o + k_{\text{н}}^2 P_k = P_o + \left(\frac{S}{S_{\text{н}}} \right)^2 P_k = 0,29 + \left(\frac{10}{60} \right)^2 1,65 = 0,336 \text{ кВт}$$

Напряжение на вторичной обмотке, соответствующее упрощенной схеме замещения трансформатора под нагрузкой:

$$U'_2 = U_1 - I_1 (r_k \cos \varphi_2 + x_k \sin \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_2 = 1$$

$$U'_2 = \frac{21000}{\sqrt{3}} - 1,73 \cdot 183 \cdot 1 = 11820 \text{ В}$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8$$

$$U'_2 = \frac{21000}{\sqrt{3}} - 1,73 \cdot (183 \cdot 1 + 260 \cdot 0,599) = 11630 \text{ В}$$

Напряжение на выводах вторичной обмотки при номинальной нагрузке:

$$U_{2\text{нн}} = \frac{\sqrt{3} U'_2}{k} = \frac{\sqrt{3} U'_2}{(U_{\text{нн}} / U_{\text{н}})}$$

$$\cos \varphi_2 = 1$$

$$U_{2\text{нн}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11820}{(21/0,4)} = 390 \text{ В}$$

$$\cos \varphi_2 = 0,8$$

$$U_{2\text{нн}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 11630}{(21/0,4)} = 383 \text{ В}$$

•

•

трансформатора?

2. Каковы условия проведения опыта короткого замыкания трансформатора?
3. Чему равно напряжение короткого замыкания в относительных единицах?
4. Что определяет мощность, измеренная в опыте короткого замыкания?

•

•

• **Задачи**

2. Номинальная мощность трехфазного трансформатора $S_H = 25$ кВ·А; номинальные напряжения $U_{1H} = 10$ кВ; вторичной обмотки $U_{2H} = 0,4$ В. Схема соединения Y/Y. Трансформатор испытан в режиме холостого хода со стороны обмотки НН. При номинальном напряжении ток $I_{2x} = 1,15$ А, потребляемая мощность $P_{2x} = 0,135$ кВт. Найти ток холостого хода трансформатора в относительных единицах и коэффициент мощности в режиме холостого хода.

3. Частота питающей сети в опыте холостого хода трансформатора $f = 49$ Гц. Какое напряжение необходимо подвести к первичной обмотке трансформатора с номинальным напряжением $U_{1H} = 400$ В и частотой 50 Гц, чтобы реактивная составляющая тока холостого хода осталась без изменений?

4. Однофазный трансформатор имеет следующие номинальные данные: $S_H = 10500$ кВ·А, $U_{1H}/U_{2H} = 110/6,3$ кВ. Опытные данные короткого замыкания при номинальных токах в обмотках $U_{1K} = 11,5$ кВ, $P_{1K} = 81,5$ кВт. Опыт проводился при температуре обмоток 75°C . Вычислить активные и индуктивные сопротивления фаз обмоток трансформатора, полагая $R_1 = R'_2$ и $X_1 = X'_2$. Какое напряжение необходимо подвести к обмотке НН при проведении опыта со стороны этой обмотки?

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• **Практическое занятие №.6**

Тема. Магнитное поле взаимной индукции многофазной обмотки машины переменного тока. Способы подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока

Цель занятия. Расчёт магнитного поля взаимной индукции многофазной обмотки машины переменного тока. Изучение способов подавления высших гармоник ЭДС машины переменного тока.

Теоретическая часть.

Разложение магнитодвижущей силы (МДС) периодической системы катушек в ряд Фурье.

Пространственное распределение МДС в момент времени $t = 0$

$$F = \sum_{v=1}^{\infty} F_{vm} \cos v\alpha \quad (6.1)$$

Амплитуда $\square$ -ой гармонической МДС периодической системы катушек

$$F_{kvm} = \frac{4}{\pi v} F_{km} k_{yv} = \frac{4}{\pi v} \sqrt{2} I_a w_k k_{yv} \quad (6.2)$$

где $\square = 1 \square 2c$, $c = 0, 2, 3 \dots$

Коэффициент укорочения шага обмотки, характеризующий влияние шага катушки y_k на амплитуду гармоник МДС,

$$k_{kv} = \sin \frac{vy_k \pi}{2\tau} \quad (6.3)$$

При выборе шага катушки

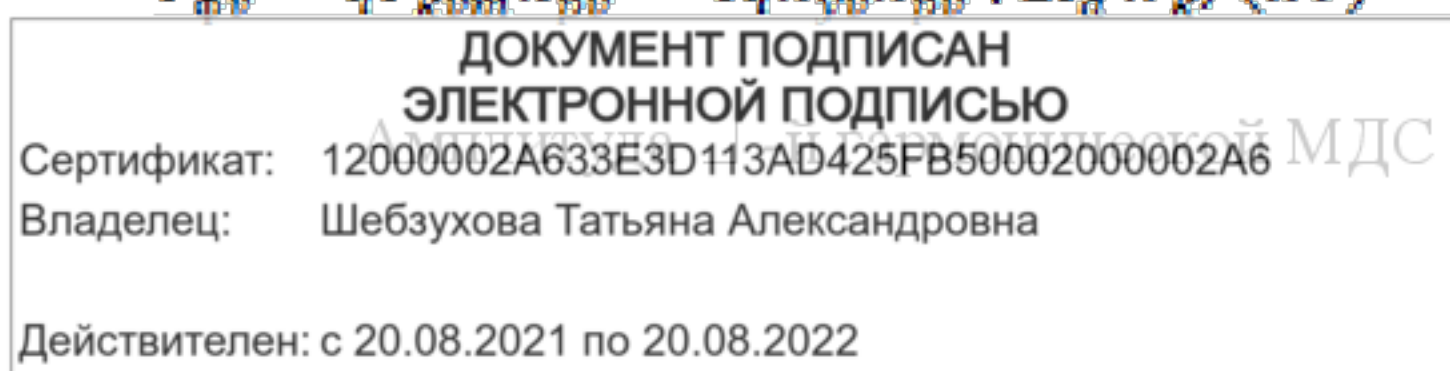
$$y_k = (v - 1) \tau / v \quad (6.4)$$

гармонических $\square$ -го порядка в МДС содержаться не будет.

Магнитодвижущая сила фазы.

Амплитуда $\square$ -й гармонической МДС фазы через амплитудный ток катушечной стороны

$$F_{fv} = q F_{km} k_{yv} = 4q k_{yv} k_{pv} \sqrt{2} I_a w_k / (\pi v) \quad (6.5)$$



фазы через действующий ток фазы $I = aI_a$

$$F_{\Phi vm} = 2\sqrt{2}Iwk_{pv}k_{yv}/(\pi pv) \quad (6.6)$$

Где $w = 2pw_K q/a$ – число витков в параллельной ветви фазы.

Коэффициент распределения обмотки:

$$k_{pv} = \frac{\sin[v\pi/(2m)]}{q \sin[v\pi/(2mq)]} \quad (6.7)$$

Обмоточный коэффициент для основной гармонической МДС

$$k_{o\delta} = k_{y1}k_{p1} \quad (6.8)$$

Порядок зубцовых высших гармонических

$$\pm kZ/p \pm 1 \pm 2mqk \pm 1, \quad (6.9)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Магнитодвижущая сила трехфазной обмотки

$$F(\alpha, t) = \sum_{v=1}^{\infty} F_{vm} \cos(\pm \omega t - v\alpha) \quad (6.10)$$

где

$$F_{vm} = (3/2)F_{\Phi vm} = 3\sqrt{2}I * w * k_{pv} * k_{yv}/(\pi vp) \quad (6.11)$$

или

$$F_{vm} = 6qk_{pv}k_{yv}\sqrt{2}I_{\alpha} w_K/(\pi v) \quad (6.12)$$

Где $\pm = 6c \pm 1, c = 0, 1, 2, 3, \dots$

Прямая гармоническая МДС трехфазной обмотки вращается с угловой скоростью

$$\Omega = w/p \quad (6.13)$$

в положительном направлении,

$\pm$ -я гармоническая МДС вращается с угловой скоростью

$$\Omega_v = \pm \Omega_1 * v \quad (6.14)$$

Элементом обмотки статора является одно- или многовитковая катушка. Элементы катушки, располагаемые в пазах, называются пазовыми сторонами, а части, находящиеся вне пазов и служащие для соединения пазовых сторон, – лобовыми частями.

Обмотки статора характеризуются параметрами:

числом фазных обмоток, m_1 – однофазные ($m_1 = 1$) и многофазные, обычно трехфазные ($m_1 = 3$);

шагом обмотки по пазам y_1 – с полным (диаметральным) шагом ($y_1 = \tau$) и укороченным шагом ($y_1 < \tau$).

Здесь τ – полюсное деление, м,

$$\tau = \pi D_1 / (2p) \quad (6.15)$$

где D_1 – внутренний диаметр статора, м;

$2p$ – число полюсов обмотки статора.

Полный шаг обмотки

$$y_1 = Z_1 / (2p) = \tau \quad (6.16)$$

В этом случае ЭДС, индуцируемая в каждом витке катушки статора вращающимся магнитным полем, определяется арифметической суммой ЭДС сторон этого витка, то есть

$$e_{\text{вит}} = e_1 + e_2 \quad (6.17)$$

Если шаг обмотки укороченный ($y_1 < \tau$), то ЭДС витка определяется геометрической суммой ЭДС его пазовых сторон, т.е. учитывается фазовый сдвиг этих ЭДС, при этом ЭДС витка, а следовательно, и ЭДС всей фазной обмотки E_y , уменьшается. Это уменьшение ЭДС, вызванное укорочением шага обмотки, учитывается коэффициентом укорочения $k_y = E_y / E_A$. Коэффициент укорочения первой (основной) гармоники:

$$k_{y1} = \sin \left(\beta * \frac{\pi}{2} \right) \quad (6.18)$$

– где $\beta = \frac{y_1}{\tau}$ относительный шаг обмотки.

Для ЭДС любой гармоники (v – номер гармоники)

$$k_{yv} = \sin \left(v\beta * \frac{\pi}{2} \right) \quad (6.19)$$

Порядок зубцовых высших гармоник

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$Z/p \pm 1 = 2m * q * k \pm 1 \quad (6.20)$$

где $k = 1, 2, 3, \dots$

Так как высшие гармоники ЭДС могут вызвать в электрических сетях и приемниках ряд нежелательных явлений, необходимо принимать меры для подавления этих гармоник.

Таблица 6.1 – Значения коэффициента k_{yv} в зависимости от относительного шага β

Относительный шаг обмотки β	4/5	6/7	1
Коэффициент укорочения k_{yv}			
1-я гармоника	0,951	0,975	1
5-я гармоника	0	0,433	1
7-я гармоника	0,573	0	

Таблица 6.2 - Коэффициенты распределения для 1, 5, 7-й гармоник

Число пазов на полюс и фазу q_1	1	2	3	4	5	6	∞
Коэффициент распределения k_p :							
1-я гармоника	1,000	0,966	0,960	0,958	0,957	0,956	0,955
3-я »	1,000	0,707	0,667	0,654	0,646	0,644	0,636
5-я »	1,000	0,259	0,217	0,204	0,200	0,197	0,191
7-я »	-1,000	-0,259	-0,178	-0,157	-0,149	-0,145	-0,136

Подавление высших гармоник ЭДС можно осуществить с помощью соответствующей конструкции обмоток. К конструктивным мерам относятся:

- 1) укорочение шага обмотки;
- 2) распределение обмотки по пазам таким образом, чтобы число катушек в катушечной группе было $q > 1$.

По своей конструкции обмотки статора разделяются на сосредоточенные и распределенные. В сосредоточенных обмотках статора обмотка каждой фазы располагается в двух пазах, а в распределенной обмотке – катушки каждой фазы занимают несколько пазов. Распределение катушек в пазах сердечника статора вызывает некоторое уменьшение ЭДС катушечной группы распределенной обмотки E_{φ} по сравнению с ЭДС катушечной группы сосредоточенной обмотки E_{Σ} .

Для количественной оценки этого уменьшения ЭДС используется коэффициент распределения обмотки, представляющий собой отношение ЭДС распределенной обмотки к ЭДС сосредоточенной обмотки:

$$k_{y1} = \sin \left(\beta * \frac{\pi}{2} \right) \quad (6.21)$$

Коэффициент распределения обмотки для первой гармоники ЭДС

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6 Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	$q_1 \sin(0.5\gamma)$
--	-----------------------

(6.22)

где γ – угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС, т.е. ЭДС, наводимых в проводниках, лежащих в соседних пазах статора, эл. град.:

где Z_1 – число пазов обмотки.

$$\gamma = 360p/Z_1 \quad (6.23)$$

Так как угол сдвига по фазе между векторами пазовых ЭДС для ν -й гармоники в ν раз больше пазового угла γ , то коэффициент распределения обмотки для любой гармоники ЭДС равен

$$k_{pv} = \frac{\sin(0.5 * \nu * q_1 * \gamma)}{q_1 * \sin(0.5 * \nu * \gamma)} \quad (6.24)$$

ЭДС фазной обмотки статора определяется выражением

$$E_{\phi 1} = 4.44\Phi * f_1 * w_1 * k_{o\phi 1} \quad (6.25)$$

где Φ – основной магнитный поток,

$$\Phi = (2/\pi)B_{\delta} * l_1 * \tau \quad (6.26)$$

B_{δ} – магнитная индукция в воздушном зазоре между статором и ротором,

f_1 – частота переменного тока в обмотке статора, Гц;

w_1 – число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$w_1 = 2pq_1 * w_k = Z_1 * w_k / m_1 \quad (6.27)$$

w_k – число витков в катушке обмотки статора;

$k_{o\phi 1}$ – обмоточный коэффициент, учитывающий уменьшения ЭДС, вызванные укорочением шага катушки и распределенной конструкцией обмотки

$$k_{o\phi 1} = k_{y1} k_{p1}$$

При выборе шага катушки

$$y_1 = \frac{(v - 1)}{v} \quad (6.28)$$

гармонических ν -го порядка в ЭДС содержаться не будет.

Пример 1.

Статор трехфазной бесколлекторной машины переменного тока с внутренним диа-

метром $D_1 = 0,2$ м; имеет число пазов $Z_1 = 36$, число полюсов $2p = 4$.

Определим ЭДС фазной обмотки статора, если шаг обмотки по пазам $y_1 = \tau$, число

витков в катушке $w_k = 4$, магнитная индукция в воздушном зазоре машины $B_{\delta} = 0,75$ Тл, а

частота тока питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Решение:

Полосное деление

$$\tau = \pi * D_1 / (2p) = 3.14 * 0.2 / 4 = 0.157 \text{ м}$$

Основной магнитный поток

$$\Phi = (2/\pi) B_\delta * l_1 * \tau = 0,64 * 0,75 * 0,2 * 0,157 = 0,015 \text{ Вб}$$

Число последовательно соединенных витков в фазной обмотке статора

$$w_1 = Z_1 * w_k / m_1 = 36 * 4 / 3 = 48 \text{ витков}$$

Число пазов на полюс и фазу

$$q_1 = Z_1 / (2p m_1) = 36 / (4 * 3) = 3 \text{ паза}$$

Коэффициент распределения и обмоточный коэффициент для первой (основной) гармоники:

$$k_{p1} = 0,96$$

$$k_{o\delta 1} = k_{p1} = 0.96.$$

ЭДС фазной обмотки

$$E_\Phi = 4,44 * \Phi * f_1 * w_1 * k_{o\delta 1} = 4,44 * 0,015 * 50 * 48 * 0,96 = 153 \text{ В.}$$

Пример 2.

Используя данные примера 1 и результаты его расчета, определить ЭДС фазной обмотки статора первой (основной) гармоники; обмотку выполнить с укороченным шагом. Рассчитать линейную ЭДС основной гармоники при соединениях обмотки статора «звездой» и «треугольником». На сколько будут ослаблены ЭДС пятой и седьмой гармоник при принятом укорочении шага обмотки на один паз.

Решение:

Полный (диаметральный) шаг

$$y_1 = Z_1 / 2p = 36 / 4 = 9 \text{ пазов}$$

Укороченный шаг

$$y_k = 9 - 1 = 8 \text{ пазов.}$$

Относительный шаг

$$\beta = y_k / y_1 = 8 / 9 = 0.89$$

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Угол сдвига фаз между векторами пазовых ЭДС:

- для первой (основной) гармоники ($\nu = 1$)

$$k_{y1} = \sin\left(\beta * \frac{\pi}{2}\right) = \sin\left(0.89 * \frac{\pi}{2}\right) = 0.985$$

- для пятой гармоники ($\nu = 5$)

$$k_{y5} = \sin\left(5 * 0.89 * \frac{\pi}{2}\right)$$

- для седьмой гармоники ($\nu = 7$)

$$k_{y7} = \sin\left(7 * 0.89 * \frac{\pi}{2}\right) = -0.353$$

Коэффициенты распределения для 1, 5, 7-й гармоник при $q_1 = 3$ (смотри таблицу 6.2)

$$k_{p1} = 0.96$$

$$k_{p5} = 0.217$$

$$k_{p7} = -0.178$$

Обмоточные коэффициенты

$$k_{o61} = 0.985 * 0.96 = 0.946$$

$$k_{o65} = 0.649 * 0.217 = 0.14$$

$$k_{o67} = -0.353 * (-0.178) = 0.062$$

ЭДС фазы основной гармоники

$$E_{\phi 1y} = 4.44 * \Phi * f_1 * w_1 * k_{o61} = 4.44 * 0.015 * 50 * 48 * 0.946 = 151 \text{ В}$$

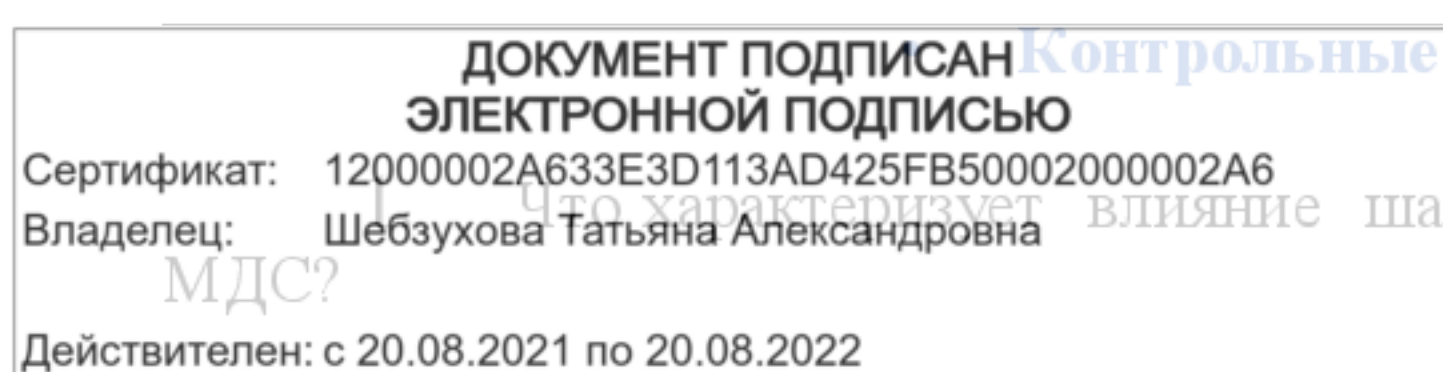
Таким образом, укорочение шага обмотки на один паз привело к уменьшению ЭДС основной гармоники на:

$$\frac{(E_{\phi 1} - E_{\phi 1y}) * 100}{E_{\phi 1}} = \frac{(153 - 151) * 100}{153} \approx 1.3\%$$

При этом ЭДС 5-й гармоники уменьшится на 35 %, в седьмой гармоники – на 65 %.

Линейная ЭДС при соединении обмоток «треугольником» останется равной фазной ЭДС $E_{\phi 1y} = 151 \text{ В}$, а при соединении «звездой», она будет равна.

$$E_L = \sqrt{3} * 151 = 261 \text{ В}.$$



Контрольные вопросы и задания

Что характеризует влияние шага катушки обмотки на амплитуду гармоник ЭДС?

2. Объясните смысл коэффициента распределения обмотки.
3. Как определить обмоточный коэффициент обмотки?
4. С какой скоростью вращается основная гармоническая МДС трехфазной обмотки?
5. Как определить полную МДС трехфазной обмотки при симметричной нагрузке?
6. Какие параметры характеризуют обмотки статора машины переменного тока?
7. Как определить ЭДС витка при укорочении шага обмотки?
8. Как с помощью конструкции обмотки осуществить подавление высших гармоник ЭДС?
9. Как влияет распределение обмотки на величину ЭДС катушечной группы?
10. Как выбрать шаг обмотки, при котором не будет в ЭДС содержаться гармонических составляющих m -го порядка?
11. Чем определяется необходимость подавления высших гармоник ЭДС обмотки машины переменного тока?

• Задачи

1. Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой основной гармонической МДС, если в зубцовых делениях полюсное деление обмотки равно 15, а ее шаг $y = 11$.
2. Общее число катушек восьмиполюсной двухслойной обмотки равно 72. Шаг обмотки в зубцовых делениях равен 7. Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой, третьей и пятой гармонических МДС.
3. Число зубцов магнитопровода равно 90. Определить шаг шестиполюсной двухслойной обмотки в зубцовых делениях, при котором пятая гармоническая в МДС содержаться не будет. Чему равен при таком шаге коэффициент укорочения для первой гармонической?
4. Определить коэффициент распределения трехфазной обмотки основной гармонической МДС фазы, если фаза состоит из двух периодических систем катушек ($q = 2$). Чему равен k_p при удвоении числа q ?
5. Трехфазная шестиполюсная обмотка с числом витков в фазе $w = 68$ и обмоточным коэффициентом $k_{об} = 0,866$ питается симметричной системой токов прямой последовательности с током в фазе А $i_A = 250 \cos 314t$ А. Определить амплитуду и частоту вращения первой гармонической МДС обмотки.
6. Определить амплитуду основной, пятой и седьмой гармонических МДС трехфазной двухслойной обмотки с числом пазов на полюс и фазу $q = 3$, шагом обмотки $y_k = 0,8\tau$, числом витков в катушке $w_k = 21$. Ток параллельной ветви $I_a = 15$ А.

7. Четырехполюсная трехфазная двухслойная обмотка содержит 60 катушек. Шаг обмотки $y = 11$ зубцовых делений. Число витков в фазе $w = 50$. Ток в фазе $I = 442$ А. Определить амплитуду и частоту вращения основной скорости и направления вращения основной, пятой и первой гармонических МДС обмотки. Частота тока $f = 50$ Гц.

Определено значение скорости и направления вращения основной, пятой и первой гармонических МДС обмотки.

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

8. Общее число катушек восьмиполюсной двухслойной обмотки равно 72. Шаг

обмотки в зубцовых делениях $y_1 = 7$. Определить коэффициент укорочения шага обмотки для первой, третьей и пятой гармонических ЭДС.

9. Число зубцов магнитопровода $Z = 90$. Определить шаг шестиполюсной двухслойной обмотки в зубцовых делениях, при котором пятая гармоническая в ЭДС содержаться не будет. Чему равен при таком шаге коэффициент укорочения для первой гармонической?

10. Вычислить обмоточный коэффициент для основной, пятой и седьмой гармонических трехфазных двухслойных обмоток, если магнитопровод имеет $Z = 72$ зубца, шаг обмотки в зубцовых делениях $y = 7$. Обмотка многополюсная $2p = 8$

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• Практическое занятие №.7

Тема. Расчет и построение якорной обмотки машины постоянного тока

Цель занятия: Научиться рассчитывать построение якорной обмотки машины постоянного тока

Теоретическая часть.

Обмотка якоря является важнейшим элементом машины и должна удовлетворять следующим требованиям:

- 1) обмотка должна быть рассчитана на заданные величины напряжения и тока нагрузки, соответствующие номинальные мощности;
- 2) обмотка должна иметь необходимую электрическую, механическую и термическую прочность, обеспечивающую достаточно продолжительный срок службы машин (до 15-20 лет);
- 3) конструкция обмотки должна обеспечить удовлетворительные условия токо-съемки с коллектора, без вредного искрения;
- 4) расход материала при заданных эксплуатационных показателях (к.п.д. и др.) должен быть минимальным;
- 5) технология изготовления обмотки должна быть по возможности простой.

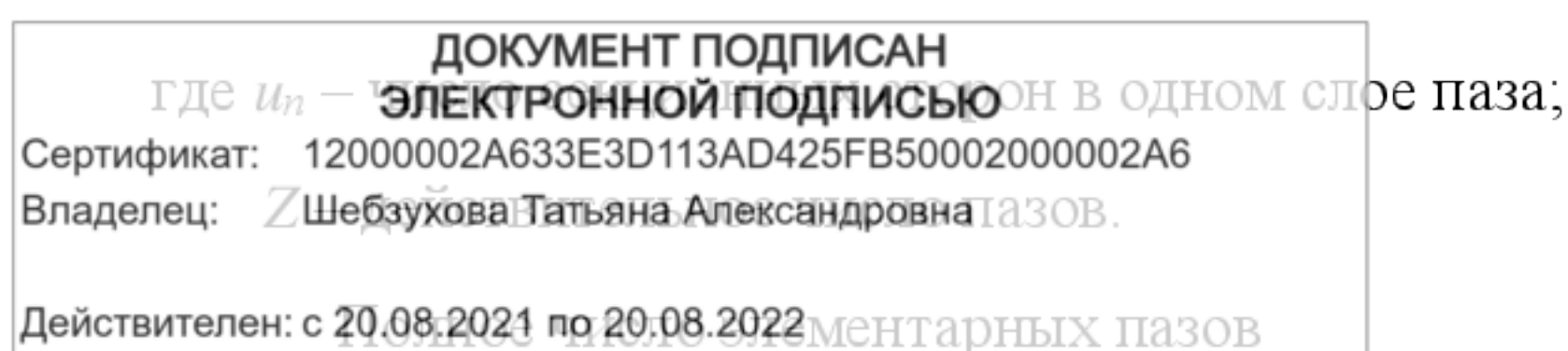
По схеме соединения проводников обмотки якоря машин постоянного тока разделяются на простые петлевые, простые волновые, сложные петлевые, сложные волновые и лягушачьи. Свое название петлевые и волновые обмотки получили по форме, которую они образуют при последовательном соединении секций; первые имеют форму петель, вторые – форму волн.

По числу слоев в пазу обмотки машин постоянного тока выполняются, как правило, двухслойными, лягушачьи – четырехслойными.

При составлении схемы обмотки необходимо определить ее шаги как по пазам, так и по коллектору.

Число элементарных пазов

$$Z_{\varepsilon} = Z \cdot u_n, \quad (18.1)$$



$$Z_3 = S = K. \quad (18.2)$$

Для построения схемы обмотки необходимо определить следующие шаги:

y_1 – первый частичный шаг, равный числу элементарных пазов по ширине секции;

y_2 – второй частичный шаг, равный числу элементарных пазов между конечной стороной при обходе секции и начальной стороной последующей секции;

y – результирующий шаг, равный сдвигу секций, следующих одна за другой по схеме обмотки; этот шаг также измеряется числом элементарных пазов;

y_k – шаг по коллектору, равный числу коллекторных делений между началом и концом секции.

Шаг y_1 обмоток постоянного тока принимается близким полюсному делению $\tau = Z_3/2p$, то есть

$$y = \frac{Z_3}{2p} \pm \varepsilon \quad (18.4)$$

где ε – укорочение или удлинение шага обмотки.

Величина является дробной частью отношения $Z_3/2p$, которая при знаке минус уменьшает его, а при знаке плюс дополняет до ближайшего целого числа

Шаг по пазам равен:

$$y_z = y_1 / u_n \quad (18.5)$$

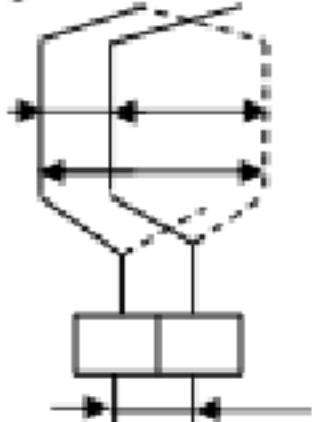
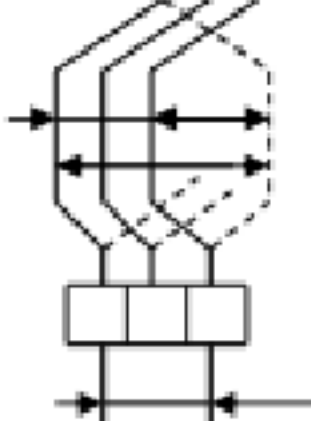
Если y_z – целое число, то обмотка является равносекционной, если y_z – дробное – ступенчатой.

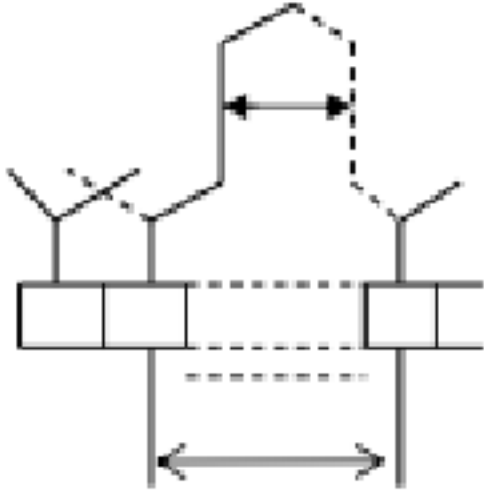
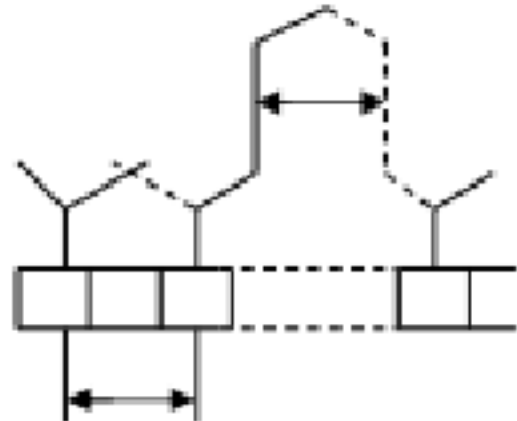
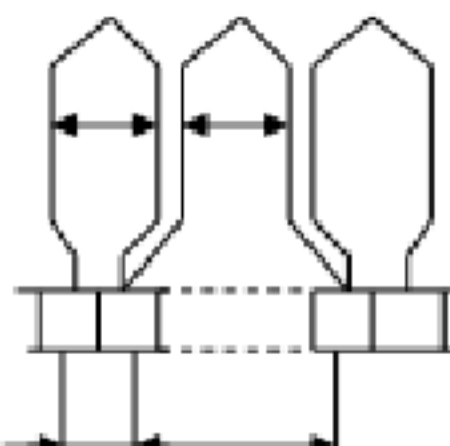
В процессе расчета обмотки необходимо определить: число параллельных ветвей обмотки $2a$ и шаги y_1 , y , y_k , а также максимально возможное число уравнивающих соединений.

Расчетные выражения в зависимости от схемы обмотки следует принять по таблице 18.1.

Таблица 18.1 – Основные данные обмоток якоря

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Тип обмотки	Число параллельных ветвей	Шаги обмотки		Максимальное число уравнивающих соединений
		y	y_1	
Простая петлевая 	$2a = 2p$	$y = y_k = \pm 1$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	K / p
Сложная петлевая двух-ходовая 	$2a = 4p$	$y = y_k = \pm 2$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	K / p

Простая волновая 	$2a = 2$	$y = y_k = \frac{K \pm 1}{p}$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	
Сложная волновая многоходовая 	$2a = 2m$	$y = y_k = \frac{K \pm m}{p}$	$y_1 = \frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	m
Лягушачья 	$2a = 2p \cdot 2m$	$y_{kn} + y_{km} = \frac{K}{p}$	$y_{1n} + y_{1m} = \frac{K}{p}$ $y_{2n} \pm y_{2m}$	—

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Порядок выполнения таблицы соединения секционных сторон обмотки:

Таблица представляет собой условное упрощенное изображение последовательно соединенных секций обмотки (рисунок 28.1), причем сплошной линией показывают секционную сторону, уложенную в верхний слой элементарного паза, штриховой – в нижний слой паза.

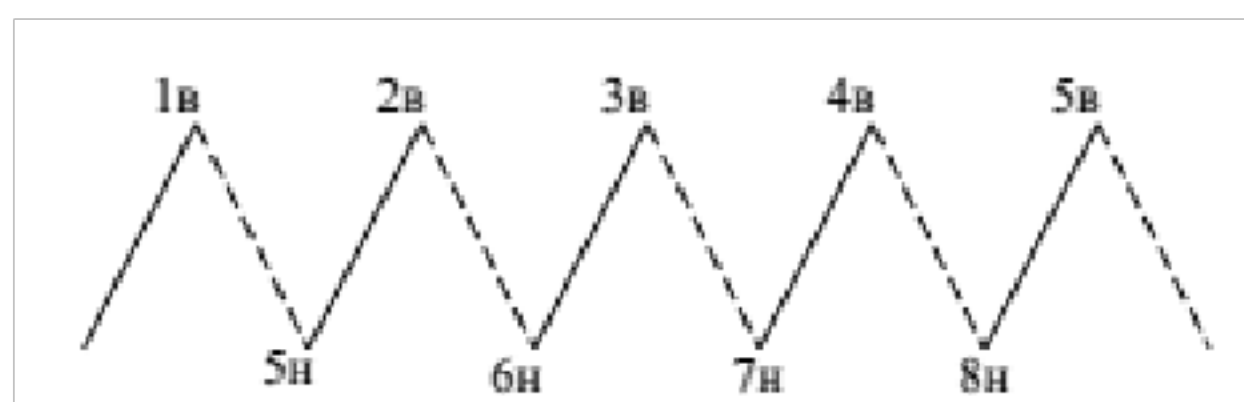


Рисунок 18.1 – Таблица соединения секционных сторон обмотки

Номера верхних сторон секций проставляются в таблице сверху, нижних – снизу, причем нумерация соответствует шагам обмотки.

Например, для обмотки, таблица которой показана на рисунке 28.2, шаги составляют: $y_1 = 4$, $y = 1$.

Первая секционная сторона для 1-й секции укладывается в верхний слой первого паза, а вторая сторона – соответственно в нижний слой $1 + y_1 = 1 + 4 = 5$ н пятого паза.

С первой секцией последовательно соединяется вторая. Верхняя секционная сторона 2-й секции укладывается в $1в + y = 1 + 1 = 2в$, т.е. в верхний слой второго паза и т.д.

Если нумерация секционных сторон в таблице выполнена верно, то для двухслойной обмотки номер каждого паза должен повториться дважды – для верхнего и нижнего слоя паза.

Развернутая схема обмотки якоря строится в соответствии с таблицей соединения секционных сторон. При этом необходимо соблюдение следующих правил:

- пазовая часть обмотки якоря изображается в виде двух параллельных линий (на каждый элементарный паз) – сплошной и штриховой, соответствующих верхнему и нижнему слою (стороне) паза. Номер паза совпадает с номером секции, уложенной в верхний слой этого паза.
- коллектор изображается в виде коллекторных пластин, причем номер коллекторной пластины соответствует номеру секции, начало которой соединяется с данной пластиной.
- для того, чтобы лобовые части секций были симметричными, нумерация коллекторных пластин должна быть сдвинута по направлению намотки (вправо) относительно нумерации пазов на половину полюсного деления

На коллектор накладываются щетки, полярность которых чередуется, а количество равно числу полюсов $2p$.

Расстояние между соседними щетками должно быть равно τ , щетки одной полярности соединяются между собой.

На развернутой схеме необходимо показать штриховой линией $1 \div 2$ уравнивающих соединения, соединяющих равнопотенциальные точки лобовых частей с шагом $y_y = Z/p$.

•

• **Контрольные вопросы и задания**

1. Какие виды якорных обмоток машины постоянного тока вы знаете?
2. Какие шаги необходимо определить при построении якорной обмотки?
3. Какая обмотка является равносекционной, какая ступенчатой?

•

• **Задачи**

Каждый студент получает индивидуальное задание по расчету обмотки и, выполняет все расчеты и построения.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• **Практическое занятие №.8**

Тема. Расчет магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке

Цель занятия: Научиться расчёту магнитной цепи машины при холостом ходе и нагрузке

формирование у студента компетенций ОПК-4, ИД-5_{ОПК-4}

Теоретическая часть.

ЭДС параллельной ветви обмотки якоря

$$E_a = 4f\omega\Phi = C_0 * \omega * \Phi \quad (19.1)$$

где f – частота ЭДС обмотки якоря;

w – число витков в параллельной ветви обмотки якоря

$$w = \frac{N}{4a} \quad (19.2)$$

C_0 – постоянный коэффициент

$$C_0 = \frac{pN}{2\pi a} \quad (19.3)$$

Φ – магнитный поток на один полюс

$$\Phi = B_\delta * l_\delta * b_\delta \quad (19.4)$$

где B_δ – магнитная индукция в зазоре;

l_δ – расчетная длина якоря;

b_δ – расчетная полюсная дуга.

Магнитный поток при холостом ходе

$$\Phi_v = a_\delta * \tau * l_\delta * B_\delta \quad (19.5)$$

где a_δ – коэффициент перекрывтия

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
 $a_\delta = b_\delta / \tau$
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

(19.6)

Результирующая МДС при холостом ходе

$$F_B = F_\delta + F_z + F_a + F_m + F_s = F_{\delta z} + F_m + F_s \quad (19.7)$$

где $F_{\delta z}$ магнитное напряжение зазора, зубцов и ярма якоря;

F_m – магнитное напряжение сердечника полюса;

F_s – магнитное напряжение станины.

Уравнение напряжения якоря при нагрузке:

– для генератора постоянного тока

$$U_r = E - I_a R_a \quad (19.8)$$

– для двигателя постоянного тока

$$U_d = E + I_a R_a \quad (19.9)$$

Пример 1. Двигатель постоянного тока параллельного возбуждения номинальной мощностью $P_n = 100$ кВт включен в сеть с напряжением $U_c = 440$ В; КПД двигателя $\eta = 89\%$; обмотка якоря простая волновая ($2a = 2$); с числом полюсов $2p = 4$, число активных проводников $N = 280$; ток в обмотке возбуждения $I_e = 0,02 I_{an}$, величина одностороннего воздушного зазора $\delta = 2$ мм; магнитная индукция в зазоре $B_\delta = 0,82$ Тл; магнитная индукция в зубцах якоря $B_z = 2,2$ Тл; коэффициент воздушного зазора $k_\delta = 1,3$; коэффициент магнитного насыщения магнитопровода двигателя $k_\delta = 1,35$.

Определить МДС реакции якоря по поперечной оси F_{qd} и число витков в полюсной катушке возбуждения w_e , необходимое для компенсации реакции якоря по поперечной оси при номинальной нагрузке двигателя.

Решение:

Ток, потребляемый двигателем в номинальном режиме

$$I_H = \frac{P_H}{U_c \eta} = \frac{100 \cdot 10^3}{440 \cdot 0,89} = 255 \text{ А.}$$

Ток в обмотке возбуждения

$$I_e = 0,02 \cdot I_H = 0,02 \cdot 255 = 5 \text{ А.}$$

Ток в цепи якоря при номинальной нагрузке

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ		$I_{an} = 255 \cdot 5 = 250 \text{ А.}$
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6	
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна	
Магнитное напряжение воздушного зазора		
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022		

$$F_g = 0,8 * B_g * \delta * k_g * 10^3 = 0,8 * 0,28 * 2 = 1,3 * 10^3 = 1700 \text{ В.}$$

МДС обмотки возбуждения в режиме холостого хода на пару полюсов

$$F_{\Sigma 0} = 2F_g * k_{\mu} = 2 * 1700 * 1,35 = 4590 \text{ А.}$$

МДС якоря на пару полюсов в режиме номинальной нагрузки

Коэффициент реакции якоря по поперечной оси при $B_z = 2,2 \text{ Тл}$ и $F_d/F_{\Sigma 0} = 8750/4590 = 1,9$ коэффициент $k_{pa} = 0,22$.

Приращение МДС возбуждения, компенсирующее влияние реакции якоря по поперечной оси,

$$F_{qd} = k_{pa} * F_{\Sigma 0} = 0,22 * 8750 = 1925 \text{ А.}$$

МДС возбуждения на пару полюсов при номинальной нагрузке двигателя, достаточное для компенсации влияния реакции якоря,

$$F_{\Sigma \Sigma} = F_{\Sigma 0} + F_{qd} = 4590 + 1925 = 6515 \text{ А.}$$

Число витков в полюсной катушке обмотки возбуждения

$$w = \frac{F_{\Sigma \Sigma}}{2I_g} = \frac{6515}{2*5} = 651 \text{ виток}$$

•

• Контрольные вопросы и задания

1. Поясните физическую сущность реакции якоря МПТ. От чего зависит характер реакции якоря?
2. Каким образом учитывается размагничивающее действие поперечной реакции якоря в инженерных расчетах?
3. Как рассчитать напряжение на зажимах генератора постоянного тока, и двигателя постоянного тока?
4. Что определяет магнитный поток на полюс в машине постоянного тока?

Задачи

1. Определить ЭДС параллельной ветви простой волновой обмотки якоря четырехполюсной машины постоянного тока, если число эффективных проводников якоря $N = 920$, частота вращения $n = 1500 \text{ об/мин}$, магнитный поток на полюс $\Phi = 0,425 * 10^{-2} \text{ Вб}$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
1000, 750, 600 об/мин. Число пар полюсов
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

1500 об/мин ЭДС машины постоянного тока
ДС обмотки якоря при частотах вращения:
машины $2p = 2$.

3. ЭДС машины постоянного тока $E = 225$ В. Определить напряжение для режима генератора и двигателя при токе якоря $I_a = 500$ А, если сопротивление цепи якоря $R_a = 0,01$ Ом.

4. Магнитный поток на полюс машины постоянного тока при номинальном возбуждении $\Phi = 1,29 \cdot 10^{-2}$ Вб, постоянный коэффициент $C_0 = 126$. Определить напряжение машины в генераторном режиме при номинальном токе 100 А, если частота вращения якоря $n = 1500$ об/мин, сопротивление цепи якоря $R_a = 0,25$ Ом.

5. Генератор постоянного тока нагружен на сопротивление нагрузки $R_n = 0,44$ Ом, напряжение генератора 220 В, сопротивление цепи якоря $R_a = 0,01$ Ом. Определить частоту вращения якоря генератора, если магнитный поток $\Phi = 2,96 \cdot 10^{-2}$ Вб, число эффективных проводников $N = 304$, обмотка якоря простая петлевая.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- **Практическое занятие №.9**

Тема. Режимы работы машины постоянного тока

Цель занятия: Изучить режимы работы машин постоянного тока.

формирование у студента компетенций ОПК-3, ИД-5_{ОПК-3}

Теоретическая часть.

Машина постоянного тока является обратимой, т.е. может работать в генераторном и двигательном режимах.

При работе машины в генераторном режиме механическая мощность, подводимая к валу машины:

$$P_1 = M_1 * \omega \quad (20.1)$$

где M_1 – вращающий момент первичного двигателя.

Механическая мощность, преобразуемая электромагнитным путем в электромагнитную мощность:

$$P_{\text{мех}} = P_1 - p_T - p_M - p_d = P_{\text{эм}} \quad (20.2)$$

где p_T – механические потери;

p_M – магнитные потери в зубцах и ярме якоря;

p_d – добавочные потери.

Электромагнитная мощность:

$$P_{\text{эм}} = c_0 * I_a * \Phi * \omega = E * I_a \quad (20.3)$$

Электрическая мощность, снимаемая со щеток якоря:

$$P_a = P_{\text{эм}} - P_{\text{э}} = UI_a \quad (20.4)$$

где $P_{\text{э}} = R_a I_a^2$ – электрические потери в цепи якоря.

Полезная электрическая мощность:

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$P = P_{\text{эм}} - P_{\text{э}} = UI_a$

(20.5)

где $P_B = R_B \cdot I_B^2$ мощность, расходуемая на питание обмотки независимого (параллельного) возбуждения.

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P/P_1 = 1 - \frac{\Sigma P}{(P_1 + \Sigma P)} \quad (20.6)$$

где $\Sigma P = p_T + p_d + p_{\Sigma} + p_B$ сумма потерь.

В режиме двигателя $U > E$, ток $I_A < 0$, поэтому мощность $P_1, P_{мех}, P_{ЭМ}, P$ и моменты M_1 и M_2 получаются отрицательными и полезная механическая мощность P_1 меньше потребляемой из сети электрической мощности P на потери в машине ΣP .

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = P_1/P = 1 - \frac{\Sigma P}{(P_1 + \Sigma P)} \quad (20.7)$$

Пример 1. Номинальная мощность двигателя постоянного тока $P_n = 25$ кВт, напряжение питания цепи якоря $U_n = 440$ В, напряжение питания цепи возбуждения $U_{\Sigma} = 220$ В, частота вращения якоря в номинальном режиме $n_n = 2200$ об/мин, сопротивление цепи якоря $r = 0,3$ Ом, цепи возбуждения $r_{\Sigma} = 60$ Ом, падение напряжения в щеточном контакте при номинальном токе $\Delta U_{щ} = 2$ В, номинальное изменение напряжения при сбросе нагрузки $\Delta U_{щ} = 2$ В, ток якоря в режиме холостого хода $I_0 = 6$ А.

Решение:

Частота вращения в режиме холостого хода

$$n \approx n_{\text{н}} - \Delta n \approx n_{\text{н}} - \Delta n / 100 \approx 2200 - 8 / 100 \approx 2376 \text{ об/мин.}$$

ЭДС якоря в режиме холостого хода (падением напряжения в щеточном контакте пренебрегаем ввиду его незначительной величины в режиме холостого хода):

$$E_{a0} = U_n - I_0 r_{\Sigma} = 440 - 6 \cdot 0,3 = 438,2 \text{ В.}$$

Момент в режиме холостого хода

$$M_0 = 9,55 \cdot 438,2 \cdot 6 / 2376 = 10,6 \text{ Н·м.}$$

Момент на валу двигателя в режиме номинальной нагрузки

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

$M_n = 9,55 \cdot 25 \cdot 10^3 / 2200 = 108,5 \text{ Н·м.}$

Электромагнитный момент двигателя при номинальной нагрузке:

$$M_H = M_0 + M_{2H} = 10,6 + 108,5 = 119 \text{ Н·м}$$

Электромагнитная мощность двигателя в режиме номинальной нагрузки:

$$P_{эм.н} = 0,105 M_H * n_H = 0,105 * 119 * 2200 = 17490 \text{ Вт.}$$

ЭДС якоря в режиме холостого хода:

$$E_{a0} = c_e \Phi n_0, \text{ откуда } c_e \Phi = E_{a0} / n_0 = 438,2 / 2376 = 0,185 ,$$

но так как $c_M / c_e = 9,55$, то

$$c_M \Phi = 9,55 c_e \Phi = 9,55 * 0,185 = 1,77 .$$

Из выражения электромагнитного момента в режиме номинальной нагрузки

$$M_H = c_M * \Phi * I_{aH}$$

определим значение тока якоря в режиме номинальной нагрузки:

$$I_{aH} = M_H / c \Phi = 119 / 1,77 = 67 \text{ А.}$$

Сумма магнитных и механических потерь двигателя пропорциональна моменту холостого хода:

$$P_{мг} + P_{мех} = 0,105 M_0 * n_0 = 0,105 * 10,6 * 2376 = 2644 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в цепи обмотки якоря:

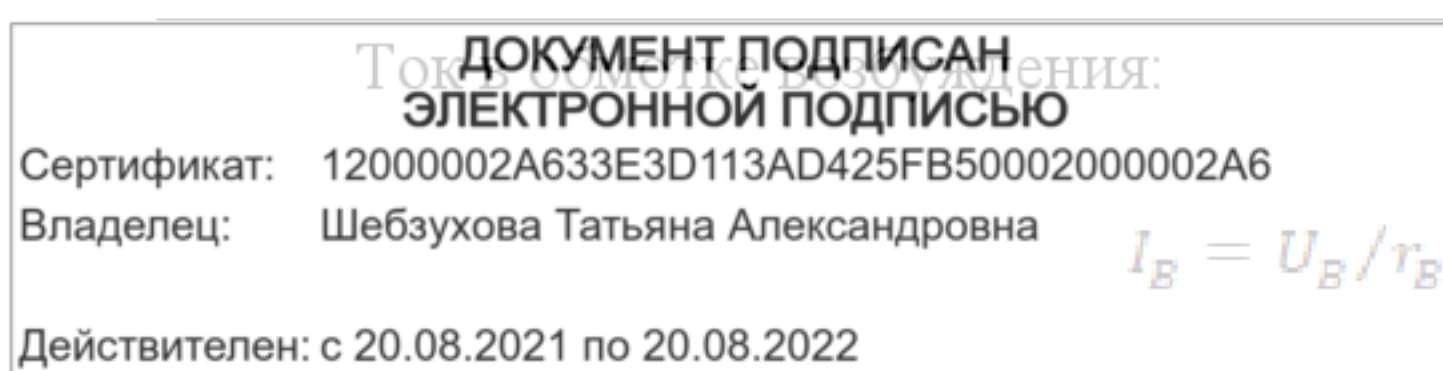
$$P_{аз} = I_{aH}^2 * \Sigma_r = 67^2 * 0,3 = 1347 \text{ Вт.}$$

Электрические потери в щеточном контакте якоря:

$$P_{щз} = I_{aH} * \Delta U_{щ} = 67 * 2 = 134 \text{ Вт.}$$

Мощность, подводимая к цепи якоря, в номинальном режиме:

$$P_{1ам} = U_H * I_{aH} = 440 * 67 = 29480 \text{ Вт.}$$



$$I_B = U_B / r_B = 220 / 60 = 3,7 \text{ А.}$$

Мощность в цепи возбуждения

$$P_B = U_B / I_B = 220 \cdot 3,7 = 814 \text{ Вт.}$$

Мощность, потребляемая двигателем в режиме номинальной нагрузки:

$$P_{1H} = P_{1aH} + P_B = 29480 + 814 = 30295 \text{ Вт.}$$

КПД двигателя в номинальном режиме:

$$\eta_H = (P_H / P_{1H}) \cdot 100 = 25 \cdot 10^3 / 30,3 \cdot 10^3 = 100 = 82,5 \, \%.$$

• Контрольные вопросы и задания

1. Какой вид имеет энергетическая диаграмма ГПТ и ДПТ?
2. Какие потери в машинах постоянного тока являются механическими?
3. Где происходят магнитные потери мощности?
4. Где происходят электрические потери в машинах постоянного тока?

• Задачи

1. Генератор постоянного тока независимого возбуждения с номинальным напряжением $U_H = 230 \text{ В}$ и номинальной частотой вращения $n_H = 1500 \text{ об/мин}$ имеет простую петлевую обмотку якоря, состоящую из $N = 200$ проводников. Число полюсов генератора $2p = 4$, сопротивление обмоток якоря при рабочей температуре $r_a = 0,175 \text{ Ом}$, основной магнитный поток $\Phi = 4,8 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$. Для номинального режима работы генератора определить: ЭДС якоря E_{aH} , ток нагрузки I_{aH} , электромагнитную мощность $P_{эм}$ и электромагнитный момент $M_{эм}$. Размагничивающим действием реакции якоря пренебречь.
2. В шестиполюсной машине постоянного тока поток возбуждения $\Phi_B = 0,01 \text{ Вб}$, якорь вращается с частотой $n = 60 \text{ об/мин}$. Определить среднее значение ЭДС, индуцируемой в проводнике обмотки якоря.
3. ЭДС генератора независимого возбуждения $E_a = 240 \text{ В}$, сопротивление якорной обмотки $r = 0,1 \text{ Ом}$. Определить напряжение на щетках генератора при токе нагрузки $I_H = 100 \text{ А}$.
4. Мощность, потребляемая генератором постоянного тока от приводного двигателя, $P_1 = 50 \text{ кВт}$, суммарные потери мощности в генераторе $\Sigma P = 5 \text{ кВт}$. Определить коэффициент полезного действия генератора.
5. При частоте вращения $n = 975 \text{ об/мин}$ двигатель постоянного тока отдает полезную мощность $P_2 = 5 \text{ кВт}$. Определить полезный момент двигателя.

якорной обмотки E_a , электромагнитную мощность $P_{эм}$, потери в обмотке возбуждения $P_{эл.В}$, суммарные потери мощности ΣP .

7. Генератор параллельного возбуждения работает на сеть напряжением $U_H = 120$ В. Сопротивления обмоток якоря и возбуждения в рабочем режиме $r_a = 0,08$ Ом, $r_B = 18$ Ом, сопротивление нагрузки $r_n = 1,2$ Ом. Определить: ток нагрузки генератора, ток в цепи возбуждения, ток якоря, ЭДС генератора, полезную мощность

• Практическое занятие №.10

Тема. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе

Цель занятия. Изучить электромагнитные процессы в асинхронных машинах при холостом ходе.

формирование у студента компетенций ОПК-4, ИД-5_{ОПК-4}

Теоретическая часть.

При неподвижном роторе асинхронная машина (АМ) представляет собой трансформатор, отличающийся от обычного трансформатора по конструкции (распределённая обмотка на статоре и роторе, наличие зазора и т.п). С физической точки зрения неподвижная АМ и трансформатор эквивалентны. Поэтому изучения АМ начинается со случая, когда $n_2=0$ а режим работы – холостой ход.

Пусть ротор АМ имеет фазное исполнение, и его обмотка разомкнута, а статор включён на сеть с напряжением U_1 и частотой f_1 . Этот режим эквивалентен трансформатору при холостом ходе, причём первичная обмотка – это статор, вторичная ротор. Под действием напряжения U_1 по обмотке статора протекает ток холостого хода, создающий магнитный поток, имеющий две

составляющие:

Φ_m – основной поток,

$\Phi_{\sigma 1}$ – поток рассеяния статора. Скорость

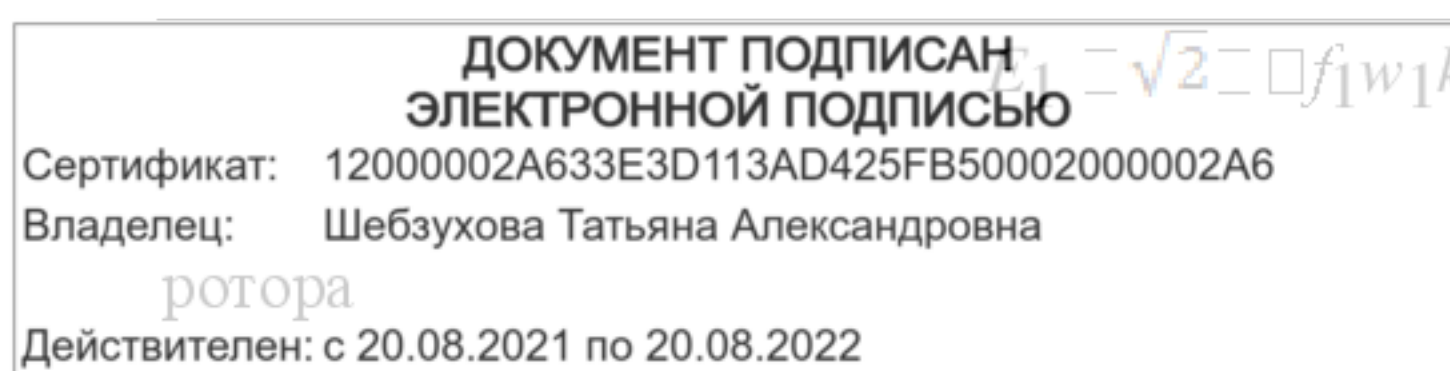
вращения потока n_1 определяется частотой питающей сети:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (11.1)$$

Основной поток создаёт в обеих обмотках ЭДС:

статора

$$E_1 = \sqrt{2} \Phi_m f_1 k_{\sigma 1} \quad (11.2)$$



$$E_2 = 2 \pi f_1 w_2 k_{об2} \Phi_m. \quad (11.3)$$

Поток рассеяния создаёт в статоре ЭДС:

$$\bar{E}_{\sigma 1} = -j \bar{I}_0 x_{\sigma 1} \quad (11.4)$$

Где $x_{\sigma 1}$ – индуктивное сопротивление рассеяния обмотки статора. Статор обладает и активным сопротивлением, учитывая которое (а, следовательно, и падение напряжения в r_1), можно записать уравнение напряжений для х.х. обмотки статора заторможенной АМ:

$$\bar{U} = \bar{I}_0 r_1 + j x_{\sigma 1} \bar{I}_0 + \bar{E}_{\sigma 1} \quad (11.5)$$

По аналогии с трансформатором обмотку ротора АМ приводят к обмотке статора, причём $\bar{E}_2' = \bar{E}_1$, а коэффициент приведения напряжений равен:

$$k_u = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 * k_{об1}}{w_2 * k_{об2}} \quad (11.6)$$

Для приведённой неподвижной АМ можно построить схему замещения, аналогичную схеме замещения трансформатора тоже определяется конструктивными особенностями.

Реактивная составляющая тока холостого хода АД:

$$I_{0p} = \frac{m_1 * p * F_{0m}}{\sqrt{2} * m_1 * w_1 * k_{об1}} \quad (11.7)$$

где m_1 – число фаз обмотки статора;

p – число пар полюсов;

F_{0m} – амплитуда МДС, образующей поток взаимной индукции Φ_m .

Активная составляющая тока холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_m}{m_1 * E_1} \quad (11.8)$$

где P_m – магнитные потери в магнитопроводе статора.

Пример 1. Принимая синусоидальное распределение индукции в зазоре, определить основной магнитный поток асинхронной машины при соединении обмоток статора звездой, если число последовательно соединенных витков фазы статора $w_1 = 336$, обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0.95$, напряжение сети $U_c = 380$ В, частота $f = 50$ Гц. Известно также, что падение напряжения в статорной обмотке составляет 4 % от фазного

Решение:

ЭДС фазы обмотки статора:

$$E_1 = U_\phi - \Delta U_\phi = \frac{380}{\sqrt{3}} - 0,04 \frac{380}{\sqrt{3}} = 210,86 \text{ В.}$$

Основной магнитный поток асинхронной машины:

$$\Phi_m = \frac{E_1}{\pi \sqrt{2} f_1 w_1 k_{об1}} = \frac{210,86}{3,14 \sqrt{2} \cdot 336 \cdot 0,96} = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Контрольные вопросы и задания:

1. Для чего необходимо приведение асинхронной машины к машине с неподвижным ротором?
2. Сравните режим холостого хода трансформатора с режимом холостого хода асинхронно машины.
3. Как определить составляющие тока холостого хода обмотки статора асинхронной машины?
4. Как определить коэффициент приведения по напряжению?
5. Как выглядит схема замещения неподвижной приведенной асинхронной машины?

Задачи

1. Вычислить магнитный поток асинхронной машины при несинусоидальном распределении индукции, если фазная ЭДС, индуцированная в обмотке статора, $E_1 = 365 \text{ В}$, число витков фазы статора $w_1 = 176$, обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0,958$, коэффициент насыщения зубцового слоя $k_z = 1,2$, частота тока $f = 50 \text{ Гц}$. Сравнить полученное значение магнитного потока с его величиной при ненасыщенной машине.
2. Найти ток идеального холостого хода четырехполюсного асинхронного двигателя по следующим данным: ЭДС, индуцированная в фазе статора, $E_{1\phi} = 213 \text{ В}$, МДС, образующая основной магнитный поток, $F_{0m} = 457,5 \text{ А}$; число витков обмотки статора $w_1 = 126$, обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0,96$, магнитные потери в магнитопроводе статора $P_m = 150 \text{ Вт}$.
3. Реактивная составляющая тока холостого хода шестиполюсного асинхронного двигателя $I_{0p} = 40 \text{ А}$. Амплитуда МДС, образующей основной магнитный поток, $F_{0m} = 1088 \text{ А}$, обмоточный коэффициент обмотки статора $k_{об1} = 0,886$. Определить число витков в фазе обмотки статора.

4. ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Олещенко Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

4. Вычислить магнитный поток асинхронной машины при несинусоидальном распределении индукции, если фазная ЭДС, индуцированная в фазе обмотки статора асинхронного двигателя при вращении ротора с 700 об/мин, частотой, что и поле статора, $E_1 = 215 \text{ В}$. Ток в статоре $I_0 = 5,6 \text{ А}$. Определить ток холостого хода и реактивную составляющую главного сопротивления обмотки статора, если магнитные потери в магнитопроводе статора $P_m = 180 \text{ Вт}$.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Практическое занятие №.11

Тема. Электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке

Цель занятия. Изучить электромагнитные процессы в асинхронных машинах при нагрузке.

Теоретическая часть.

Скорость поля асинхронной машины n_1 называют синхронной, потому что она постоянна и определяется f_1 , а скорость ротора n_2 – асинхронной, потому что она меньше, чем n_1 .

Относительная разность скоростей вращения n_1 и n_2 называется скольжением s .

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (12.1)$$

В нормальных режимах АД $s = 1,5 \div 7\%$

Скорость вращения ротора:

$$n_2 = n_1(1 - s) \quad (12.2)$$

Частота тока в обмотке ротора:

$$f_2 = sf_1 \quad (12.3)$$

Режимы работы асинхронной машины:

- 1) двигательный: $0 < s < 1$;
- 2) генераторный: $s < 0$;
- 3) тормозной (противовключение): $1 < s < \infty$.

Действующее значение ЭДС взаимной индукции в фазе вращающегося ротора:

$$E_{2s} = \sqrt{2} f_1 s \omega_2 k_{o\phi 2} \Phi_m = s E_2. \quad (12.4)$$

Действующее значение ЭДС рассеяния ротора:

$$E_{2s} = x_{2s} I_2 \quad (12.5)$$

где индуктивное сопротивление рассеяния обмотки ротора при скольжении:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

(12.6)

где индуктивное сопротивление рассеяния неподвижного ротора:

$$x_2 = 2\pi f_1 L_2 \quad (12.7)$$

Ток в фазе ротора, обусловленный действием ЭДС вращения E_{2s} :

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}} \quad (12.8)$$

Уравнение токов асинхронной машины:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2 \quad (12.9)$$

где $\dot{I}'_2$ – приведенный ток ротора

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{I}_2}{k_1} \quad (12.10)$$

где k_1 – коэффициент приведения по току

$$k_1 = \frac{m_1 k_{o61} w_1}{m_2 k_{o62} w_2} \quad (12.11)$$

Коэффициенты приведения сопротивлений

$$k = k_U k_1 \quad (12.12)$$

Уравнение напряжений для режима КЗ АМ такое же, как и для трансформатора

$$\dot{U}_{1k} = -\dot{E}_{1k} + \dot{I}_1 z_k \quad (12.13)$$

где $z_k = z_1 + z'_2$

Пример 1. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором имеет следующие данные: максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре $B_m = 1,5$ Тл, диаметр расточки статора $D_1 = 180$ мм, длина сердечника статора $l_1 = 141$ мм, число полюсов обмотки статора и ротора $2p = 4$, число последовательно соединенных витков в фазных обмотках статора $w_1 = 48$, ротора $w_2 = 8$, обмоточные коэффициенты статора и ротора $k_{o61} = k_{o62} = 0,93$. Определить фазные значения ЭДС в обмотке статора E_1 и в обмотке ротора при неподвижном его состоянии E_2 и вращающемся со скольжением $s = 8\%$, частоту тока в неподвижном и вращающемся роторе. Частота тока питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

$$\tau = \frac{\pi D_1}{2p} = \frac{3,14 \cdot 180}{4} = 141 \text{ мм.}$$

Основной магнитный поток

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta} * I_1 * \tau = \frac{2}{3,14} 1,5 * 180 * 10^{-3} * 141 * 10^{-3} = 0,019 \text{ Вб}$$

ЭДС фазной обмотки статора

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 k_{\phi 1} \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 48 \cdot 0,93 \cdot 0,019 = 188 \text{ В.}$$

ЭДС в обмотке неподвижного ротора

$$E_2 = 4,44 f_1 w_2 k_{\phi 2} \Phi = 4,44 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 0,93 \cdot 0,019 = 31 \text{ В.}$$

ЭДС во вращающемся роторе при скольжении

$$E_{2s} = s * E_2 = 0,08 \cdot 31 = 2,5 \text{ В.}$$

Частота тока в неподвижном роторе $f_2 = f_1 = 50 \text{ Гц}$, частота во вращающемся роторе

$$f_2 = s f_1 = 0,08 \cdot 50 = 4 \text{ Гц.}$$

• Контрольные вопросы и задания

1. Каким скольжением определяется двигательный режим работы асинхронной машины?
2. Как определить ЭДС вращения?
3. Как определяется коэффициент приведения сопротивления роторной цепи?
4. Каким образом обмотку ротора АМ приводят к обмотке ротора, а вращающуюся машину к неподвижной?

• Задачи

1. Шестиполосная асинхронная машина питается от трехфазной сети с частотой 60 Гц. Скольжение машины равно 0,025. Найти угловую скорость и частоту вращения поля и ротора. Как изменятся эти величины при частоте 400 Гц? В каком режиме работает машина?

2. Ротор асинхронного двигателя вращается с угловой скоростью $\omega = 298 \text{ рад/с}$. В каком режиме и при каком скольжении будет работать машина в первый момент после переключения обмоток статора на противоположное направление вращения, если

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

3. Ротор трехфазного асинхронного двигателя вращается с частотой $n = 1440 \text{ об/мин}$. Определить ЭДС взаимной индукции в фазе ротора E_{2s} , если синхронная частота

вращения $n_1 = 1500$ об/мин, а ЭДС при неподвижном роторе $E_2 = 200$ В.

4. ЭДС, индуцируемая в фазе ротора асинхронной машины при скольжении $s = 0,03$, равна 6 В. Найти ток в обмотке неподвижного ротора, если активное сопротивление фазы обмотки ротора $r_2 = 0,01$ Ом, а индуктивность рассеяния $L_{2\sigma} = 2,2 \cdot 10^{-4}$ Гн. Частота сети $f_1 = 50$ Гц.

5. Активное сопротивление фазы обмотки ротора асинхронной машины с фазным ротором $r_2 = 0,01$ Ом, ЭДС взаимной индукции в фазе ротора при неподвижном роторе $E_2 = 212$ В, ток $I_2 = 2400$ А. Определить индуктивное сопротивление рассеяния фазы обмотки ротора при скольжении $s = 0,03$.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• **Практическое занятие №.12**

Тема. Потери, КПД асинхронного двигателя

Цель занятия. Научиться расчёту потерь и КПД асинхронного двигателя.

формирование у студента компетенций ОПК-4, ИД-5_{ОПК-4}

Теоретическая часть.

Из сети к первичной обмотке асинхронного двигателя подводится мощность:

$$P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos \varphi_1 \quad (13.1)$$

Часть этой мощности теряется в виде электрических потерь в первичной обмотке

$$P_{эл1} = m_1 I_1^2 r_1 \quad (13.2)$$

а часть – в стали статора (магнитные потери)

$$P_{\text{мг}} = m_1 I_0^2 r_{\text{м}} = \frac{m_1 E_1^2}{r_{\text{м}}} \quad (13.3)$$

Оставшаяся часть передается электромагнитным способом на ротор, согласно схеме замещения (электромагнитная мощность)

$$P_{\text{эм}} = m_1 * I_2'^2 \frac{r_2}{s} = m_1 E_1 I_2' \cos \psi_2 \quad (13.4)$$

Часть $P_{\text{эм}}$ теряется в виде тепла в обмотке ротора (электрические потери в обмотке ротора)

$$P_{\text{эл2}} = m_1 * I_2'^2 * r_2' = m_2 * I_2^2 * r_2 \quad (13.5)$$

оставшаяся часть превращается в механическую мощность, развиваемую на роторе

$$P_{\text{мех}} = P_{\text{эм}} - p_{\text{эл2}} = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s} \quad (13.6)$$

часть $P_{\text{мех}}$ теряется в виде механических потерь $p_{\text{мех}}$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

0,5% от P_1 при $I_1 = I_N$.

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

очень трудно, поэтому их принимают равными

Полезная мощность на валу

$$P_2 = P_{\text{мх}} - p_{\text{мх}} - p_{\text{д}}; \quad (13.7)$$

$$P_2 = P_1 - \Sigma p, \quad (13.8)$$

где суммарные потери

$$\Sigma p = p_{\text{эл1}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{эл2}} + p_{\text{мх}} + p_{\text{д}} \quad (13.9)$$

КПД двигателя определяется как

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} \quad (13.10)$$

Из выражения для $P_{\text{эм}}$ и $p_{\text{эл2}}$ вытекают соотношения

$$p_{\text{эл2}} = s P_{\text{эм}}; \quad (13.11)$$

$$P_{\text{мх}} = (1 - s) P_{\text{эм}}. \quad (13.12)$$

из которых видно, что при $s = 0$ потерь в роторе нет (идеальный холостой ход), а при $s = 1$ вся $P_{\text{эм}}$ идет на потери в обмотке ротора, а $P_{\text{мх}} = 0$. Поэтому с точки зрения КПД чем меньше s , тем лучше ($s_{\text{н}} = 0,02 - 0,05$).

Пример 1. Асинхронный трехфазный двигатель при напряжении сети $U_c = 380$ В развивает номинальную мощность $P_{\text{н}} = 10$ кВт, вращаясь с частотой $n_{\text{н}} = 2920$ об/мин и потребляя ток $I_{\text{н}} = 18,6$ А при коэффициенте мощности $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,913$. В режиме холостого хода двигатель потребляет из сети мощность $P_0 = 325$ Вт при токе $I_0 = 5,04$ А. Активное сопротивление обмотки статора $r_1 = 0,326$ Ом, механические потери мощности $p_{\text{мх}} = 130$ Вт. Схема соединения обмотки статора – «звезда». Определить потери мощности в меди статора и ротора, потери в стали, добавочные потери при нагрузке, коэффициент полезного действия АД.

Решение:

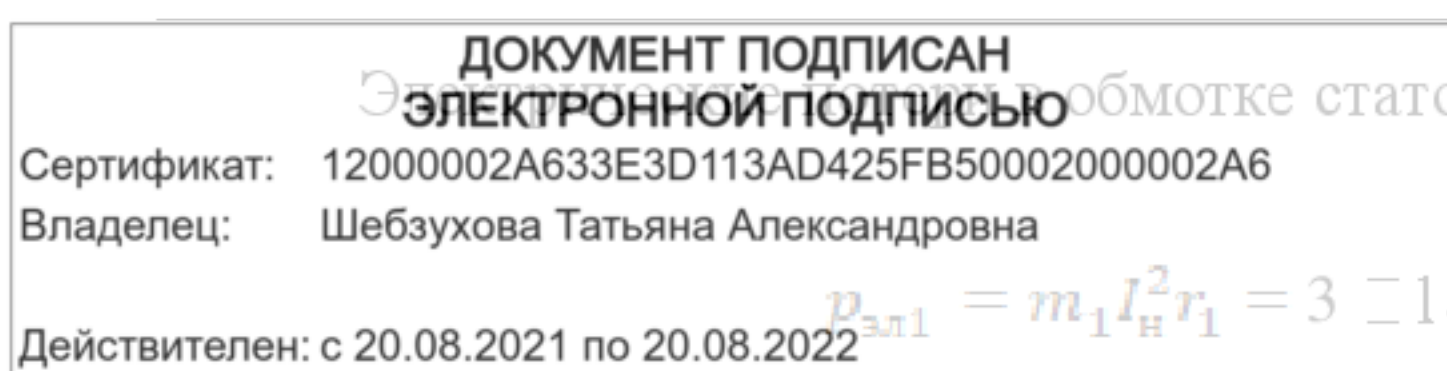
При решении задачи принято допущение, что сумма потерь в стали и механических потерь – величина постоянная.

Потери в стали:

$$P_{\text{ст}} = P_0 - p_{\text{мх}} = 325 - 130 = 195 \text{ Вт.}$$

Потери в обмотке статора:

$$p_{\text{эл1}} = m_1 I_{\text{н}}^2 r_1 = 3 \cdot 18,6^2 \cdot 0,326 = 338 \text{ Вт.}$$



Потребляемая из сети мощность:

$$P_1 = \sqrt{3} \cdot U_{1H} \cdot I_{1H} \cdot \cos \varphi_H = 380 \cdot 18,6 \cdot 0,913 = 11163,8 \text{ Вт.}$$

Электромагнитная мощность:

$$P_{эм} = P_1 - P_{ст} - P_{эл1} = 11163,8 - 170 - 338 = 10655,8 \text{ Вт}$$

Электрические потери в обмотке ротора:

$$P_{эл2} = S \cdot P_{эм} = 0,027 \cdot 10655,8 = 287,7 \text{ Вт.}$$

где при частоте вращения магнитного поля статора $n_1 = 3000$ об/мин скольжение

$$s = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{3000 - 2900}{3000} = 0,027$$

Добавочные потери:

$$P_{\partial} = P_{эм} \cdot P_H = P_{эл2} = P_{мх} = 10655,8 \cdot 10000 = 287,7 \cdot 130 = 238 \text{ Вт}$$

Суммарные потери мощности:

$$-P = P_{эл1} + P_{эл2} + P_{ст} + P_{мх} + P_{\partial} = 338 + 287,7 + 170 + 130 + 238 = 1163,8 \text{ Вт.}$$

Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{P_1 - \Sigma P}{P_1} \cdot 100\% = \frac{10000}{11163,8} \cdot 100\% = 89,6\%$$

•
•

• Контрольные вопросы и задания

1. Какие потери в асинхронном двигателе относятся к постоянным потерям, а какие к переменным?
2. Какие потери относятся к механическим потерям в асинхронном двигателе?
3. Чем определяются добавочные потери в АД и как они рассчитываются?
4. Перечислите все виды потерь мощности в асинхронном двигателе.
5. Какова зависимость между электрическими потерями в обмотке ротора АД и электромагнитной мощностью?

• Задачи

1. Электрические потери в обмотке статора АД $P_{эл1} = 500$ Вт. Мощность, подводимая к двигателю, 13,8 кВт. Определить электромагнитную мощность, мощность на валу двигателя, механические потери в асинхронном двигателе, механические и добавочные потери, если частота вращения магнитного поля статора $n_1 = 3000$ об/мин, частота вращения ротора $n = 1450$ об/мин, КПД машины 89,6%. Магнитные потери в магнитопроводе статора принять равными 2/3 от электрических потерь в обмотке статора.

2. Асинхронный двигатель при напряжении сети 380 В в режиме холостого хода потребляет из сети ток 30 А с коэффициентом мощности 0,09. Активное сопротивление фазы шестиполусной обмотки статора, соединенной в звезду, равно 0,07 Ом. Под номинальной нагрузкой двигатель потребляет из сети активную мощность 145 кВт при коэффициенте мощности 0,88 и вращается с частотой $n = 965$ об/мин. Пренебрегая механическими и добавочными потерями, определить полезный вращающий момент на валу двигателя. Частота питающей сети $f = 50$ Гц.

3. Потребляемая асинхронным двигателем мощность 16,7 кВт, напряжение сети 380 В, коэффициент мощности 0,88. Активное сопротивление обмотки статора, измеренное между ее линейными выводами, 0,56 Ом. Скольжение – 0,033. Предположим, что магнитные потери в сердечнике статора равны половине электрических потерь в обмотке статора, механические и добавочные потери составляют 5 % от суммарных потерь. Определить полезную мощность и коэффициент полезного действия двигателя.

4. Электромагнитная мощность асинхронного двигателя $P_{эм} = 500$ Вт, полная механическая мощность $P_{мх} = 470$ Вт. Найти скольжение, при котором работает двигатель, и электрические потери в роторе.

5. Четырехполюсный АД с фазным ротором при напряжении сети 380 В в режиме холостого хода вращается с частотой 1500 об/мин и при коэффициенте мощности 0,08 потребляет из сети ток 25 А. Активное сопротивление фазы обмотки статора, соединенной в звезду, равно 0,02 Ом. Обмотка ротора включена в треугольник. Сопротивление обмотки ротора, измеренное на кольцах, равно 0,008 Ом. Под номинальной нагрузкой двигатель потребляет из сети 110,5 кВт при коэффициенте мощности 0,85, линейный ток в роторной цепи 278,5 А. Предполагая, что механические потери равны магнитным потерям в сердечнике статора, определить скорость вращения ротора в номинальном режиме.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• **Практическое занятие №.13**

Тема. Механическая характеристика асинхронного двигателя

Цель занятия. Научиться рассчитывать механическую характеристику асинхронного двигателя.

Теоретическая часть.

Механической характеристикой называется зависимость электромагнитного момента от скольжения $M_{эм} = f(s)$, при $U_1, f_1 = \text{const}$.

Известно, что

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_1} \quad (14.1)$$

где

$$\omega_1 = \frac{2\pi n_1}{60} \quad (14.2)$$

Уравнение механической характеристики

$$M_{эм} = \frac{pm_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad (14.3)$$

где

$$\omega_1 = 2\pi f_1 \quad (14.4)$$

Скольжение, при котором $M_{эм}$ достигает максимальных значений $\pm M_m$, называется критическим $\pm s_{кр}$.

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2}} \quad (14.5)$$

Обычно в знаменателе r_1 по сравнению с $x_{\sigma 1}$ и $x'_{\sigma 2}$ мало и можно получить

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

(14.6)

Максимальный момент двигателя

$$M_m \cong \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1(x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})} \quad (14.7)$$

Для практического построения механической характеристики часто используют формулу Клосса, которая определяет связь между текущим значением $M_{эм}$ и M_m , согласно которой

$$\frac{M_{эм}}{M_m} \cong \frac{2}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}} \quad (14.8)$$

Начальный пусковой момент

$$M_n = \frac{pm_1 U_1^2 r'_2}{\omega_1 [(r_1 + r'_2)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2]} \quad (14.9)$$

Эксплуатационная механическая характеристика АД – это зависимость $M_2 = f(n_2)$, а чаще $n_2 = f(M_2)$, имеет вид:

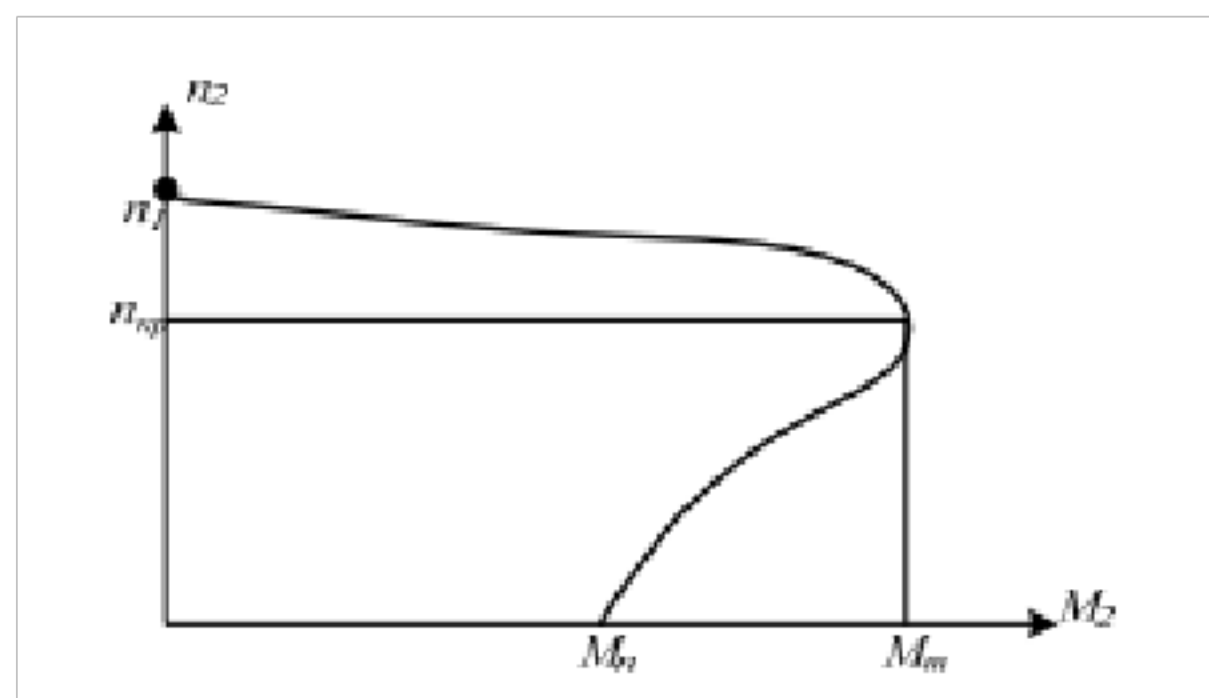


Рисунок 14.1 – Эксплуатационная механическая характеристика АД

Пример 1. Трехфазный асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором серии А2, работающий от сети частотой 50 Гц напряжением 380 В. при соединении обмотки статора «звездой», имеет номинальные параметры: полезная мощность $P_n = 22$ кВт, частота вращения $n_n = 1455$ об/мин, КПД = 90 %, коэффициент мощности $\cos \varphi_{1n} = 0,88$, кратность пускового тока $I_n/I_n = 7$, кратность пускового момента $M_n/M_n = 1,2$ и максимального момента $M_m/M_n = 2$, активное сопротивление фазной обмотки статора 0,21 Ом. Требуется рассчитать параметры и построить механическую характеристику двигателя $n_2 = f(M)$. Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания принять равным $\cos \varphi_k = 0,5 \cos \varphi_{1n}$

$$P_{1H} = P_H / \eta = 22 / 0,9 = 24,4 \text{ кВт.}$$

Потребляемый двигателем ток в режиме номинальной нагрузки

$$I_{1H} = \frac{P_{1H}}{3 \cdot U_{1\phi} \cos \varphi_{1H}} = \frac{24400}{3 \cdot 220 \cdot 0,88} = 42 \text{ А}$$

Пусковой ток двигателя

$$I_n = I_{1H} \frac{I_n}{I_{1H}} = 42 \cdot 7 = 294 \text{ А}$$

Сопротивление короткого замыкания двигателя

$$z_k = \frac{U_{1\phi}}{I_n} = \frac{5220}{294} = 0,75 \text{ Ом}$$

Коэффициент мощности в режиме короткого замыкания

$$\cos \varphi_K = 0,5 = 0,88 = 0,44 \qquad \sin \varphi_K = 0,895 .$$

Активная и индуктивная составляющие сопротивления короткого замыкания

$$r_K = z_K \sin \varphi_K = 0,75 = 0,895 = 0,67 \text{ Ом;}$$

$$x_K = z_K \cos \varphi_K = 0,75 = 0,44 = 0,33 \text{ Ом.}$$

Скольжение в режиме номинальной нагрузки

$$s_H = \frac{n_1 - n_H}{n_1} = \frac{1500 - 1455}{1500} = 0,03$$

Приведенное значение активного сопротивления фазы обмотки ротора

$$r_2' = r_k - r_1 = 0,33 - 0,21 = 0,12 \text{ Ом}$$

Номинальное значение электромагнитного момента

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 r_2' / s_H}{2 \pi f_1 [(r_1 + r_2' / s_H)^2 + x_K^2]} = \frac{2 \cdot 3 \cdot 220^2 \cdot 0,12 / 0,03}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 [(0,21 + 0,12 / 0,03)^2 + 0,67^2]} = 204 \text{ Н * м}$$

Максимальный момент

$$M_m = M \cdot \frac{M_m}{M} = 204 \cdot 2 = 408 \text{ Н * м}$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН

ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Пусковой момент

$$M_n = 204 * 1,2 = 245 \text{ Н} * \text{м}$$

Критическое скольжение

$$s_{кр} = s_H \left[\frac{M_m}{M} + \sqrt{(M_m/M)^2 - 1} \right] = 0,03 [2 + \sqrt{2^2 - 1}] = 0,11$$

Момент при скольжении $s = 0,5$

$$M = \frac{pm_1 U_1^2 + r_2' / s_H}{2\pi f_1 [(r_1 + r_2' / s_H)^2 + x_k^2]} = \frac{2 * 3 * 220^2 * 0,12 / 0,5}{2 * 3,14 * 50 [(0,21 + 0,12 / 0,5)^2 + 0,67^2]} = 341 \text{ Н} * \text{м}$$

Рассчитав частоту вращения по формуле

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

Таблица 14.1 – Результаты расчета механической характеристики

Номер	1	2	3	4	5
Скольжение	0	0,03	0,11	0,5	1
Частота вращения, об/мин	1500	1455	1335	750	0
Момент, Н*м	0	204	410	341	245

По результатам расчета построить механическую характеристику $n_2 = f(M)$.

• Контрольные вопросы и задания

1. Какая характеристика называется механической?
2. Поясните физический смысл механических характеристик АМ.
3. Какое скольжение соответствует максимальному моменту асинхронного двигателя, как его рассчитать?
4. Чему равно скольжение в момент пуска асинхронного двигателя?

• Задачи

1. Определить приведенное активное сопротивление обмотки ротора трехфазного четырехполосного асинхронного двигателя, имеющего номинальную мощность 110 кВт, номинальную частоту вращения $n = 1470$ об/мин, номинальное фазное напряжение $U_{1n} = 220$ В, частоту $f_1 = 50$ Гц, кратность максимального момента $M_m/M_n = 2$, активное сопротивление обмотки статора $r_1 = 0,021$ Ом.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен с 20.08.2021 по 20.08.2022

2. Определить номинальный ток трехфазного асинхронного двигателя в номинальном режиме при частоте вращения $n = 2930$ об/мин. Частота сети $f_1 = 50$ Гц. Построить механическую характеристику двигателя по следующим данным: кратность максимального момента $M_m/M_n = 2,2$, КПД $\eta = 88\%$.

3. При какой частоте вращения асинхронный двигатель развивает максимальный момент, если отношение максимального момента к номинальному моменту $M_m/M_n = 2,2$, а номинальная частота вращения шестиполусного двигателя при частоте сети 50 Гц $n = 983$ об/мин.

4. Четырехполусный асинхронный двигатель при номинальной нагрузке потребляет из сети активную мощность $P_1 = 16,9$ кВт. Номинальная частота вращения $n = 1470$ об/мин, суммарные потери в двигателе $\Sigma p = 1,9$ кВт. Отношение пускового момента к номинальному $M_n/M_n = 1,1$. Определить приведенное активное сопротивление обмотки ротора, если активное сопротивление обмотки статора $r_1 = 1,1$ Ом, индуктивные сопротивления обмотки статора и ротора $x_1 = x_2 = 5,2$ Ом. Частота сети $f_1 = 50$ Гц.

Рекомендуемая литература

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- **Практическое занятие №.14**

Тема. Однофазный асинхронный двигатель

Цель занятия. Изучить строение и характеристики однофазного асинхронного двигателя.

Теоретическая часть.

В тех случаях, когда потребление электрической энергии невелико (жилые дома, торговые предприятия и др.) или, когда трудно выполнить 3- фазную сеть (железные дороги, электрифицируемые на переменном токе), применяются однофазные сети. При этом возникает необходимость использования однофазных двигателей переменного тока.

Однофазный асинхронный двигатель имеет на статоре однофазную обмотку, а на роторе – короткозамкнутую обмотку в виде беличьей клетки. Можно представить, что 1- фазный асинхронный двигатель получается из 3- фазного путем отключения одной фазы статора.

Однофазный ток статора создает пульсирующее магнитное поле, которое можно разложить на 2 поля, имеющих равные амплитуды и вращающиеся в противоположные стороны.

$$\dot{\Phi} = \dot{\Phi}_{\text{пр}} - \dot{\Phi}_{\text{обр}} \quad (15.1)$$

$$\dot{\Phi}_{\text{пр}} = \dot{\Phi}_{\text{обр}} = \frac{1}{2} \dot{\Phi}_m \quad (15.2)$$

Прямое поле вращается с синхронной скоростью

$$n_{\text{пр}} = n_1 = \frac{60f_1}{p} \quad (15.3)$$

Обратное – с такой же скоростью, но с другим знаком.

$$n_{\text{обр}} = -n_1 \quad (15.4)$$

Прямая волна имеет по отношению к ротору скольжение

$$s_1 = s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (15.5)$$

Обратная волна имеет по отношению к ротору имеет скольжение

$$s_2 = \frac{-n_1 - n}{-n_1} = 2 - s \quad (15.6)$$

Под действием прямого и обратного полей в роторе наводится ЭДС соответствующей частоты и протекают токи, которые, взаимодействуя со своими полями будут создавать вращающие моменты, противоположные по знаку. В момент пуска $M_{np} = -M_{обр}$, поэтому результирующий пусковой момент равен нулю и однофазный асинхронный двигатель не может самостоятельно прийти во вращение при подключении его к сети, а нуждается в постороннем толчке.

При небольших s асинхронный двигатель развивает вращающий момент, равный M_n , но его надо подтолкнуть. Механическая характеристика однофазного асинхронного двигателя имеет вид суммы двух характеристик:

1) $M_{np} = f(s)$; 2) $M_{обр} = f(s)$, получается при подстановке в уравнение механической характеристики вместо s величины $2-s$ и с учетом того, что M_{np} и $M_{обр}$ на характеристике имеют разные знаки

$$M_{обр} = - \frac{pm_1 U_1^2 * \frac{r_2'}{2-s}}{2\pi f_1 \left[\left(r_1 + \frac{r_2'}{2-s} \right)^2 + (x_{\sigma 1} + x'_{\sigma 2})^2 \right]} \quad (15.7)$$

Зависимость $M_{эм} = f(s)$ однофазного асинхронного двигателя показывает, чтобы появился пусковой M_n необходимо во время пуска двигателя создать в нем вращающееся магнитное поле. Для этого на статоре двигателя помимо рабочей обмотки РО применяют ещё одну – пусковую. Эти обмотки располагают на статоре так, чтобы их оси были смещены на 90° эл в пространстве, а по ним протекали токи, сдвинутые во времени на 90° . Для получения временного сдвига в цепь пусковой обмотки включают фазосдвигающий элемент, в качестве которого используют: R , L или C . При достижении частотой вращения значения близкого к номинальному, пусковую обмотку отключают с помощью реле. Таким образом, во время пуска – двигатель 2-х фазный, в рабочем режиме – однофазный.

•
•

• Контрольные вопросы и задания

1. Почему невозможен самостоятельный запуск однофазного асинхронного двигателя?
2. Что произойдет, если работающий трехфазный АД перейдет в однофазный режим (сгорит предохранитель в одной из фаз)?
3. Какое назначение имеет фазосдвигающий элемент в схемах включения однофазных АД?
4. Какой документ имеет обратная волна по отношению к ротору?

• **Задачи**

1. Частота вращения ротора однофазного асинхронного двигателя $n = 1400$ об/мин, двигатель четырехполюсный. Частота питающей сети 50 Гц. С каким скольжением перемещается ротор по отношению к прямой и обратной волнам магнитных полей обмотки статора?

2. Определить электромагнитный момент однофазного четырехполюсного асинхронного двигателя при частоте вращения ротора $n = 1390$ об/мин. Параметры схемы замещения: $r_{1*} = r_{2*}' = 0.04; x_{1*} = x_{2*}'; r_{0*} = 0, x_{0*} = 2.8$. Двигатель работает при напряжении $U_{1*} = 1$ и частоте 50 Гц.

3. При работе трехфазного асинхронного двигателя оборвался один из линейных проводов. Оценить изменение линейного тока двигателя, если мощность на валу двигателя осталась неизменной.

4. Асинхронный конденсаторный двигатель при напряжении $U_1 = 220$ В имеет в фазе, включенной непосредственно в сеть, ток $I_B = 5,2 - j3$ А. Определить величину емкости, обеспечивающей получение кругового поля.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• **Практическое занятие №.15**

Тема. Пусковые свойства асинхронного двигателя

Цель занятия. Расчёт пусковых характеристик АД.

формирование у студента компетенций ОПК-4, ИД-5_{ОПК-4}

Теоретическая часть.

По типу ротора различают способы пуска двигателей с фазным и короткозамкнутым ротором.

Пуск двигателей с фазным ротором производится с помощью реостата в цепи ротора. Добавочное сопротивление r_d включается в цепь ротора с одной стороны для уменьшения пускового тока ротора, равного

$$r'_d = \frac{E'_2}{(r'_2 + r_d) + jx'_{2\sigma}} \quad (16.1)$$

а с другой – для увеличения пускового момента M_n . Причем r_d выбирается так, чтобы $M_n = M_m$, а $s_{кр}=1$, следовательно

$$s_{кр} \approx \frac{c_1(r'_2 + r'_d)}{x_{\sigma 1} + c_1 x'_{2\sigma}} \quad (16.2)$$

Откуда

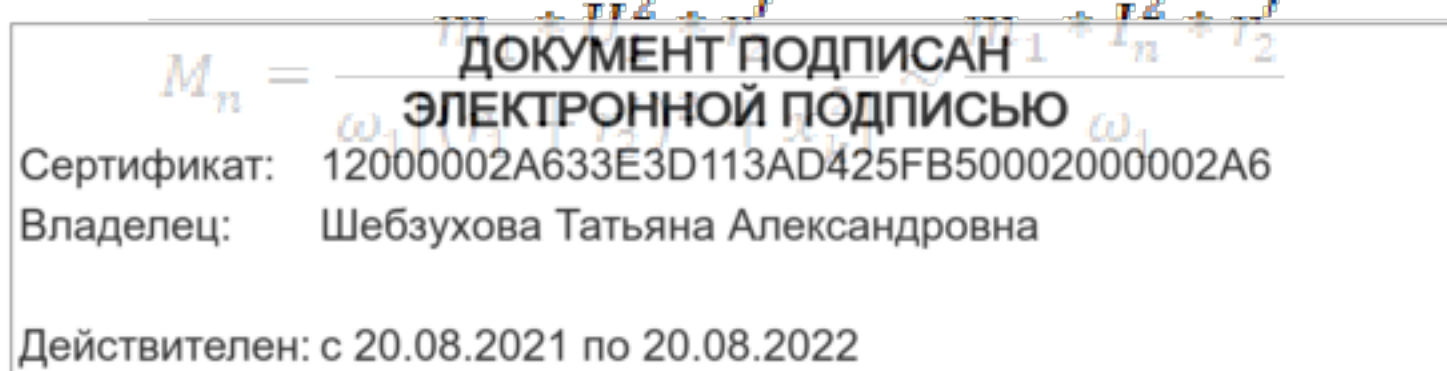
$$r'_d = x_k - r'_2 * C_1 / C_1 \quad (16.3)$$

Начальный пусковой ток двигателя с фазным ротором

$$I_n \approx \frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + x_k^2}} \quad (16.4)$$

Начальный пусковой момент двигателя с фазным ротором

$$M_n = \frac{U_1^2}{\omega_1 \sqrt{(r_1 + r'_2)^2 + x_k^2}} \quad (16.6)$$



Начальный пусковой момент максимальный, если сопротивление фазы обмотки ротора

$$r'_{2m} = \sqrt{r_1^2 + x_k^2} \approx x_k \quad (16.6)$$

Для расчета активного сопротивления добавочного резистора $r_{доб}$, необходимого для получения заданного повышенного скольжения s при заданной (номинальной) нагрузке:

$$r_d = r_2 (s/s_n - 1) \quad (16.7)$$

Способы пуска асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором: прямой, реакторный, автотрансформаторный, переключением «звезда–треугольник».

Прямой пуск – $I_c = I_n$; $M_{н.пр.} = M_n$.

Пуск через реактор с индуктивным сопротивлением x_p :

$$I_c = I_n / \alpha; M_{н.р.} = M_n / \alpha^2 \quad (16.8)$$

где

$$\alpha = \sqrt{[r_k^2 + (x_k + x_p)^2] / (rk^2 + x_k^2)} \quad (16.9)$$

Пуск через автотрансформатор с коэффициентом трансформации k

$$I_c = I_n / k^2; M_{н.ат.} = M_n / k^2 \quad (16.10)$$

Пример 1. Для асинхронного двигателя с фазным ротором, номинальная мощность $P_n = 15$ кВт, номинальное скольжение $s_n = 5$ %, перегрузочная способность $\lambda = M_{max}/M_n = 3,0$; число полюсов $2p = 8$, сопротивление обмотки ротора $r_2 = 0,37$ Ом. Рассчитать сопротивления резисторов трехступенчатого пускового реостата ПР (рис. 26.1).

Решение:

Номинальная частота вращения

$$n_n = n_1 (1 - s_n) = 750 \cdot 1 - 0,05 = 712 \text{ об/мин.}$$

Номинальный момент двигателя

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$M_n = 9,55 P_n / \eta_n = 15000 / 712 = 201 \text{ Н·м.}$

Трёхступенчатое значение момента переключений, равным номинальному

$$M_2 = 1.0 M_H = 1,0 \cdot 201 = 204 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Отношение начального пускового момента к моменту переключений принимаем

$$\lambda = M_1 / M_2 = 2,1.$$

Начальный пусковой момент

$$M_1 = M_2 \cdot \lambda = 201 \cdot 2,1 = 422 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

т.е. $M_1 / M_2 = 422 / (3 \cdot 201) = 0,7$; это позволяет применить аналитический метод расчета сопротивлений пускового реостата.

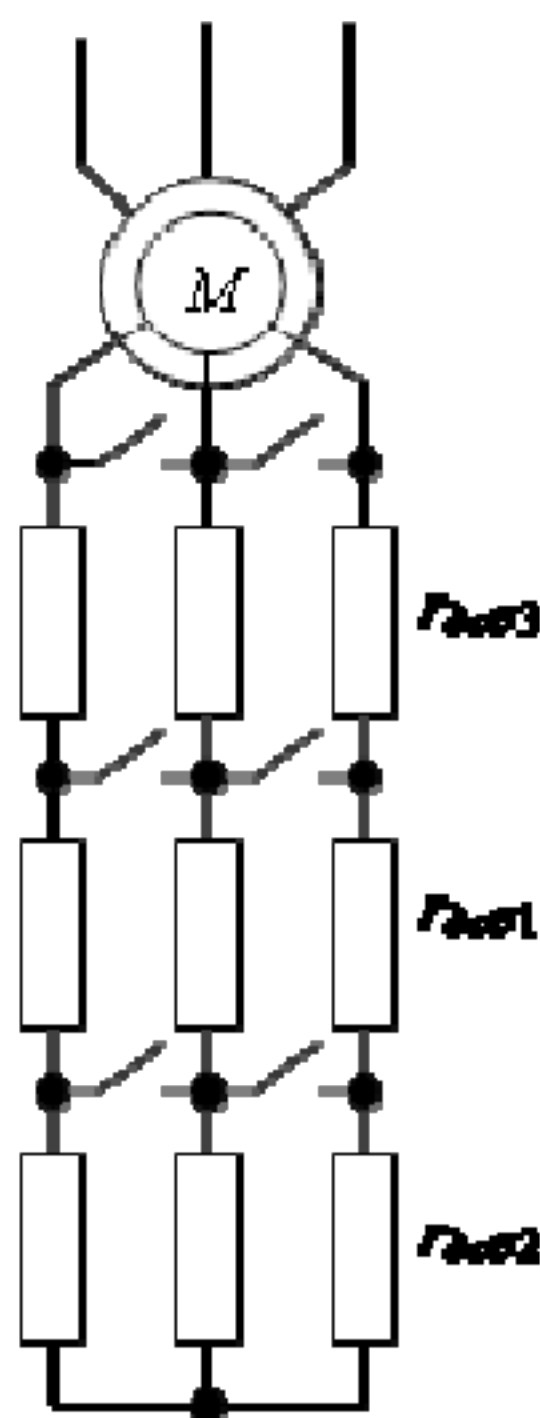


Рисунок 16.1 – Трехступенчатый пусковой реостат

Сопротивление резистора третьей ступени ПР

$$r_{доб3} = r_2 (\lambda - 1) = 0,37 / (2,1 - 1) = 0,41 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора второй ступени ПР

$$r_{доб2} = r_{доб3} \cdot \lambda = 0,41 \cdot 2,1 = 0,86 \text{ Ом}.$$

Сопротивление резистора первой ступени

$$r_{доб1} = r_{доб2} \cdot \lambda = 0,86 \cdot 2,1 = 1,8 \text{ Ом}.$$

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

$$R_{пр1} = r_{доб1} + r_{доб2} + r_{доб3} = 1,8 + 0,86 + 0,41 = 3,07 \text{ Ом}.$$

Сопротивление ПР на второй ступени

$$R_{\text{ПР2}} = r_{\text{доб2}} + r_{\text{доб3}} = 0,86 + 0,41 = 1,27 \text{ Ом.}$$

Сопротивление ПР на третьей ступени

$$R_{\text{ПР3}} = r_{\text{доб3}} = 0,41 \text{ Ом.}$$

• Контрольные вопросы и задания

1. Какие ограничения имеет прямой пуск в ход асинхронного двигателя?
2. Для чего нужен пусковой реостат в АД с фазным ротором?
3. Чем автотрансформаторный пуск АД предпочтительнее реакторного пуска?
4. Почему нежелателен реостатный пуск АД с короткозамкнутым ротором?

• Задачи

1. Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором серии 4А имеют следующие данные каталога, приведенные в таблице 10.1: номинальная мощность P_n ; номинальное скольжение s_n ; КПД η_n ; коэффициент мощности $\cos \varphi_n$; ток ротора I_{2n} ; ЭДС ротора E_2 ; перегрузочная способность $\lambda_n = M_{\text{max}}/M_n$.
Определить: номинальный M_n и максимальный M_{max} моменты; критическое скольжение $s_{\text{кр}}$ в режиме естественной механической характеристики; сопротивление пускового реостата $R_{\text{ПР}}$, необходимого для получения кратности пускового момента $M_{\text{П}}/M_n = 1,5$, и сопротивление $r_{\text{доб}}$, требуемое для получения частоты вращения $n_2 = 0,5 n_1$ при номинальном нагрузочном моменте.

Таблица 10.1 – Данные для задачи 1

Тип двигателя	Величины							
	P_n , кВт	$2p$	s_n , %	η_n , %	$\cos \varphi_n$	I_{2n} , А	E_2 , В	M_{max}/M_n
4АНК225М8	30	8	5	86,5	0,8	165	120	1,8
4АНК250SM8	37	8	5,5	57,5	0,8	190	115	2,2
4АНК250И8	45	8	4	89	0,82	190	140	2,2
4АНК250М8	55	8	3,5	89,5	0,83	185	190	2,2
4АНК280S8	75	8	4	90,5	0,84	257	190	1,9
4АНК280М8	90	8	4	90,5	0,84	267	214	1,9
4АНК315S8	110	8	3,5	91,5	0,84	311	225	1,9
4АНК315М8	132	8	3,5	92	0,84	364	247	1,9
4АНК355S8	160	8	2,7	92,5	0,86	353	285	1,7
4АНК355М8	200	8	2,7	92,5	0,86	359	350	1,7

2. Определить величину начального пускового тока при прямом включении в сеть и величину начального пускового момента трехфазного асинхронного двигателя по следующим данным: номинальная мощность $P_n = 7,5$ кВт, номинальное фазное напряжение $U_{1n} = 220$ В, частота вращения $n_n = 720$ об/мин, $\cos \varphi_n = 0,75$, КПД $\eta = 86$ %, кратность начального пускового момента $M_{\text{П}}/M_n = 1,4$, кратность начального пускового тока $I_{\text{П}}/I_n = 6$.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

3. С помощью реактора ток в сети при пуске трехфазного асинхронного двигателя ограничен до значения $I_c = 2I_n$. Возможен ли пуск двигателя при моменте нагрузки на валу $M_B = 0,15 \text{ Н}\cdot\text{м}$, если кратность начального пускового момента двигателя $k_n = 1,2$, а кратность начального пускового тока $k_I = 5$?

4. Номинальная мощность трехфазного асинхронного двигателя $P_n = 2000 \text{ кВт}$, номинальная частота вращения $n_n = 1490 \text{ об/мин}$, кратность начального пускового момента $k_n = 1,2$. Напряжение питающей сети $U_{1c} = 6 \text{ кВ}$. Обмотка статора соединена в звезду. Определить начальный пусковой момент двигателя при автотрансформаторном пуске со снижением напряжения на зажимах машины до $U_1 = 4 \text{ кВ}$.

5. Начальный пусковой ток трехфазного асинхронного двигателя $I_n = 130 \text{ А}$ при коэффициенте мощности $\cos \varphi_n = 0,65$, начальный пусковой момент $M_n = 450 \text{ Н}\cdot\text{м}$. Напряжение сети $U_c = 380 \text{ В}$. Обмотка статора двигателя соединена в звезду. Определить величину активного сопротивления, которое необходимо включить в цепь статора для снижения пускового тока в 2,5 раза. Чему равен при этом начальный пусковой момент двигателя? Какое индуктивное сопротивление обеспечит аналогичные условия пуска?

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• **Практическое занятие №.16**

Тема. Регулирование частоты вращения асинхронного двигателя

Цель занятия. Изучить решения по регулированию частоты вращения асинхронного двигателя.

Теоретическая часть.

Способы регулирования угловой скорости ротора

$$\omega = \omega_1(1 - s) = \frac{2\pi f}{p}(1 - s) \quad (17.1)$$

Регулирование частоты вращения за счет изменения угловой скорости вращения поля:

1) изменением частоты тока; при этом для поддержания $\Phi = \text{const}$ при изменении частоты необходимо выполнение условий:

$$U_1/f_1 = \text{const при } M_B = \text{const}$$

$$U_1/\sqrt{f_1} = \text{const при } M_B = \text{const}/\omega$$

$$U_1/f^2 = \text{const при } M_B = k\omega^2$$

2) изменением числа пар полюсов.

Регулирование частоты вращения путем изменения скольжения:

1) изменением напряжения;

2) изменением активного сопротивления цепи обмотки фазного ротора; при этом при введении в цепь обмотки ротора дополнительного сопротивления r_d критическое скольжение:

$$s_{кр} = \pm(r'_2 + r_d)/\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (17.2)$$

С введенным сопротивлением r_d скольжение на механической характеристике двигателя

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

(17.3)

где s – скольжение на естественной механической характеристике ($r_\delta = 0$)

3) введением дополнительной ЭДС в цепь обмотки фазного ротора.

Скольжение после введения дополнительной ЭДС

$$s_1 = s - k'_d \quad (17.4)$$

где $k'_d = \dot{E}_d / \dot{E}_2 > 0$ если $\dot{E}_d$ в фазе с $\dot{E}_2$, и $k'_d < 0$, если $\dot{E}_d$ в противофазе с $\dot{E}_2$.

• Контрольные вопросы и задания

1. Способы регулирования угловой скорости ротора
2. Регулирование частоты вращения за счет изменения угловой скорости вращения
3. Регулирование частоты вращения путем изменения скольжения

• Задачи

1. Напряжение на зажимах трехфазного асинхронного двигателя, частота вращения которого регулируется изменением частоты тока, увеличилось в 1,41 раза. Регулирование частоты вращения осуществляется при условии $P_2 = \text{const}$. Определить соответствующее увеличение частоты тока.

2. Определить величину дополнительного сопротивления R_δ при введении которого в цепь обмотки фазного ротора шестиполусного асинхронного двигателя частота вращения ротора при той же нагрузке снизится от значения $n = 950$ об/мин до $n = 600$ об/мин. Сопротивление обмотки ротора $R_2 = 0,009$ Ом, частота питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

3. Номинальная частота вращения шестиполусного асинхронного двигателя при частоте 50 Гц $n_H = 950$ об/мин. Активное сопротивление обмотки фазного ротора $R_2 = 0,1$ Ом. Как изменится частота вращения двигателя, если при неизменной нагрузке ввести добавочное сопротивление $R_\delta = 0,5$ Ом?

4. Введением дополнительного сопротивления в цепь ротора асинхронного двигателя с фазным ротором частота вращения двигателя в номинальном режиме снижена на 25 %. Определить величину дополнительного сопротивления R_δ и оценить изменение КПД при таком режиме, если номинальная мощность шестиполусного двигателя $P_H = 160$ кВт, номинальная частота вращения $n_H = 970$ об/мин, активное сопротивление обмотки ротора $R_2 = 0,01$ Ом, номинальный КПД $\eta_H = 93\%$. Частота питающей сети $f_1 = 50$ Гц.

5. При номинальной частоте вращения $n_H = 950$ об/мин шестиполусного асинхронного двигателя с фазным ротором ЭДС в обмотке ротора $E_{2s} = 9,2$ В. В этом режиме в цепь обмотки ротора вводится дополнительная ЭДС $E_\delta = 5$ В, находящаяся в фазе с E_{2s} , и тогда частота вращения двигателя при этом частота вращения двигателя? Определить частоту вращения двигателя при введении E_δ , находящейся в противофазе с E_{2s} .

- **Практическое занятие №.17**

Тема. Электромагнитные процессы в синхронной машине.

Цель занятия. Расчёт электромагнитных процессов в синхронной машине.

Теоретическая часть.

Характерным признаком синхронных машин является жесткая связь между частотой вращения ротора n_1 и частотой переменного тока в обмотке статора f_1 :

$$n_1 = f_1 * 60 / p \quad (7.1)$$

В обмотке статора в процессе работы синхронной машины индуцируется ЭДС и протекают токи, которые создают магнитодвижущую силу (МДС), максимальное значение которой

$$F_1 = \frac{\sqrt{2}}{\pi} * m_1 * I_d * w_1 * k_{o61} / p \quad (7.2)$$

Эта МДС создает вращающееся магнитное поле, а в воздушном зазоре δ машины создается магнитная индукция.

Амплитуда продольной составляющей МДС обмотки якоря

$$F_{dm} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} * m_1 * I_d * w_1 * k_{o61} / p \quad (7.3)$$

Амплитуда поперечной составляющей МДС обмотки якоря

$$F_{qm} = \frac{\sqrt{2}}{\pi} * m_1 * I_q * w_1 * k_{o61} / p \quad (7.4)$$

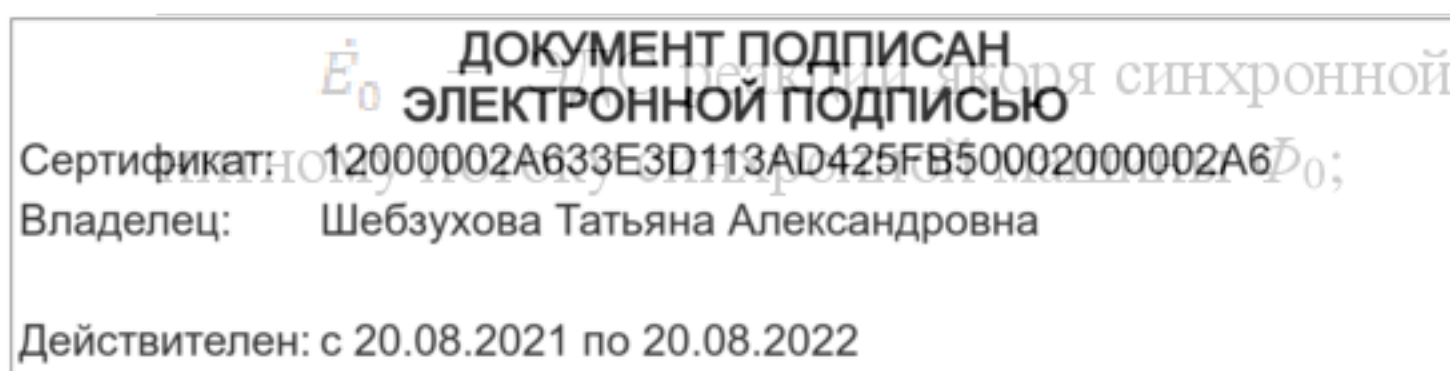
Где $I_d = I |\sin \beta|$ и $I_q = I |\cos \beta|$ – действующее значение продольной и поперечной систем токов якоря;

β – угол между ЭДС возбуждения E_f и током I (или МДС F_{am}).

Для явнополюсной синхронной машины справедливо уравнение напряжений:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{1d} + \dot{E}_{1q} + \dot{E}_{\sigma 1} - \dot{I}_1 * r_1 \quad (7.5)$$

где:



машины, пропорциональная основному маг-

$\dot{E}_{1d}$ – ЭДС реакции якоря синхронной машины по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по поперечной оси F_{1d} ;

$\dot{E}_{1q}$ – ЭДС реакции якоря по продольной оси, пропорциональная МДС реакции якоря по поперечной оси F_{1q} ;

$\dot{E}_{\sigma 1}$ – ЭДС рассеяния, обусловленная наличием магнитного потока рассеяния Φ_{σ} , величина этой ЭДС пропорциональна индуктивному сопротивлению рассеяния обмотки статора x_1

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j \dot{I}_1 * x_1 \quad (7.6)$$

$\dot{I}_1 r_1$ – активное падение напряжения в фазной обмотке статора, обычно при решении задач этой величиной пренебрегают ввиду ее небольшого значения.

Для неявнополюсной синхронной машины уравнение напряжений имеет вид

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_\sigma - \dot{I}_1 * r_1 \quad (7.7)$$

Здесь

$$\dot{E}_\sigma = \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} \quad (7.8)$$

где $\dot{E}_1$ – ЭДС реакции якоря неявнополюсной синхронной машины.

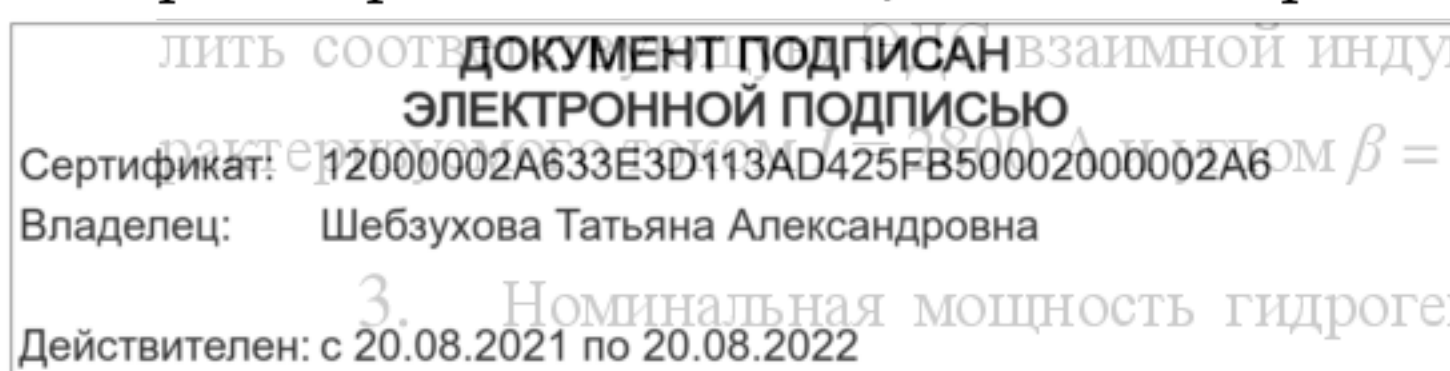
• Контрольные вопросы и задания

1. Как определить синхронную скорость вращения синхронной машины?
2. Какое поле в синхронной машине называется полем реакции якоря?
3. Какое поле реакции якоря является поперечным, а какое продольным?
4. Напишите уравнение напряжения для явнополюсной синхронной машины.
5. Напишите уравнение напряжения для неявнополюсной синхронной машины.

• Задачи

1. Определить магнитный поток взаимной индукции, соответствующий току $I = 1300$ А в трехфазной обмотке двухполюсного турбогенератора, его потокосцепление с фазой обмотки статора и индуцируемую в ней ЭДС, если известно: число витков в фазе обмотки $w_1 = 16$, число пазов на полюс и фазу $q = 8$, шаг обмотки $y = 20$, расчетный зазор $\delta = 3,3$ см, полюсное деление $\tau = 150$ см, расчетная длина $l_{\text{ср}} = 210$ см, частота тока 50 Гц.

2. По известным значениям главных индуктивных сопротивлений обмотки якоря по продольной $X_{ad} = 2,02$ Ом и поперечной $X_{aq} = 1,53$ Ом осям гидрогенератора определить магнитный поток взаимной индукции якоря E_{ad} и E_{aq} для режима работы, характеризованного углом $\beta = 50^\circ$.



3. Номинальная мощность гидрогенератора $S_n = 26200$ кВ·А, номинальное ли-

нейное напряжение $U_{нл} = 10,5$ кВ, частота тока $f = 50$ Гц, соединение фаз – звезда, номинальная частота вращения $n_n = 125$ об/мин. Найти амплитуду основной гармонической МДС обмотки якоря, если число витков в фазе $w_1 = 126$,, обмоточный коэффициент $k_{об} = 0,94$. Найти составляющие МДС по продольной и поперечной осям при активно-индуктивной ($\beta = 50^\circ$) нагрузке.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- **Практическое занятие №.18**

Тема. Построение векторных диаграмм синхронного генератора

Цель занятия. Научиться строить векторные диаграммы синхронного генератора

Теоретическая часть.

Векторная диаграмма ЭДС синхронных генераторов с одной стороны, позволяет на стадии проектирования определять значение $F(x)$ (а, следовательно, и основные конструктивные данные) для обеспечения необходимого режима работы, с другой – оценить эксплуатационные характеристики уже готовой машины при различной нагрузке, не производя при этом многочисленных опытов.

Два типа задач, о которых говорилось выше, определяют два основных вида векторных диаграмм: различают диаграммы Blondеля и диаграммы Потье.

Диаграммы Блонделя

Эти диаграммы используются для анализа характеристик генератора и строятся в следующем порядке. Исходным является уравнение синхронного генератора:

$$\dot{U} = \dot{E} - jx_{ad}\dot{I}_d - j\dot{I}_q x_{aq} - jx_{aa}\dot{I} - \dot{I} * r_a \quad (8.1)$$

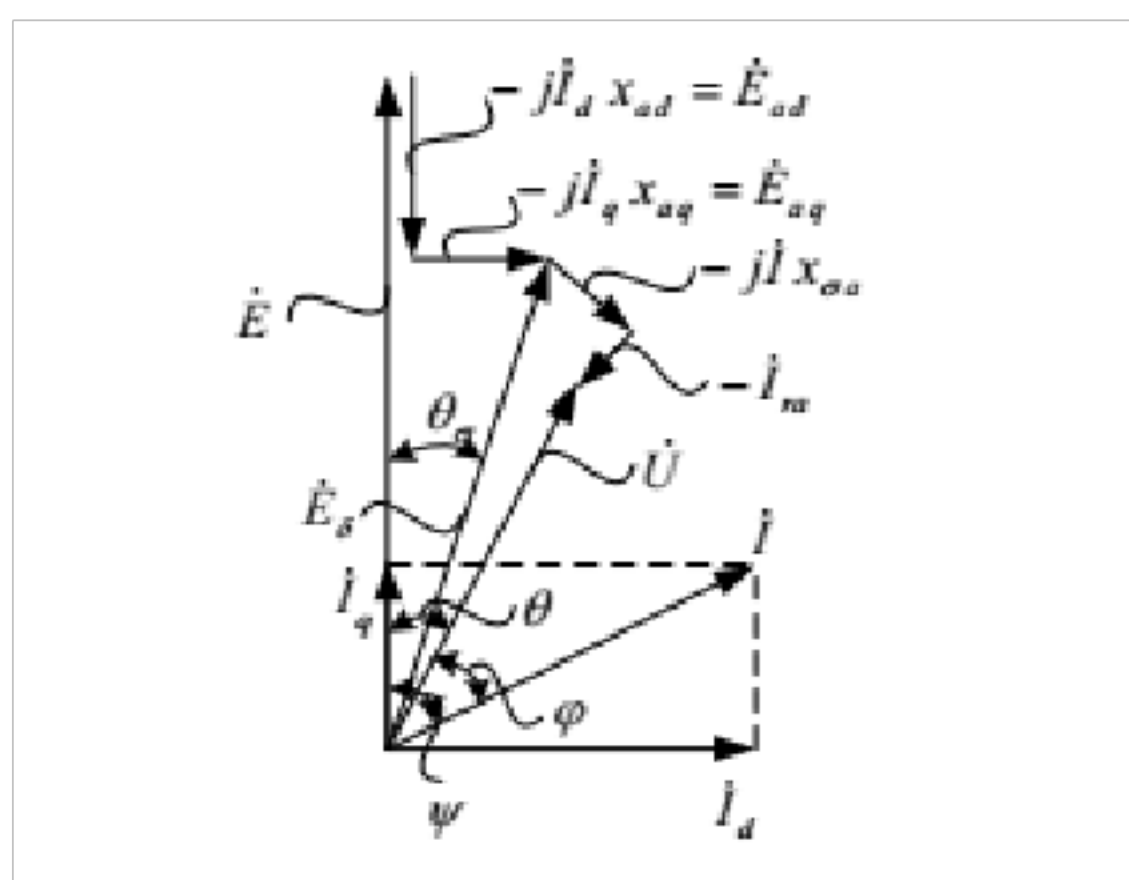


Рисунок 8.1 – Векторная диаграмма Blondеля с учетом сопротивлений реакции якоря (для $R-L$ нагрузки)

Это 1-й вид векторных диаграмм строится в указанном ниже порядке:

$$\dot{E} \rightarrow \dot{I} \rightarrow \dot{E}_{ad} \rightarrow \dot{E}_{aa} \rightarrow \dot{E}_{\delta} \rightarrow \dot{E}_{\sigma\sigma} \rightarrow \dot{I}_{ra} \rightarrow \dot{U}$$

называется углом нагрузки. В генераторном режиме U и φ считается положительным. Название P (активной мощности) синхронного генератора.

$$P = m \dot{U} \dot{I} \cos \varphi \quad (8.2)$$

Из диаграммы можно проследить, что, если, $\dot{U}, \dot{I} = const$, а φ – меняется, то меняется

$$\dot{I}_q \Rightarrow \dot{E}_{aq}, \alpha \Rightarrow u \theta.$$

2-й вид диаграммы Блонделя основан на уравнении, записанном через синхронные сопротивления:

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_d x_d - j\dot{I}_q x_q - \dot{I} r_a \quad (8.3)$$

и строится в том же порядке, как и предыдущая.

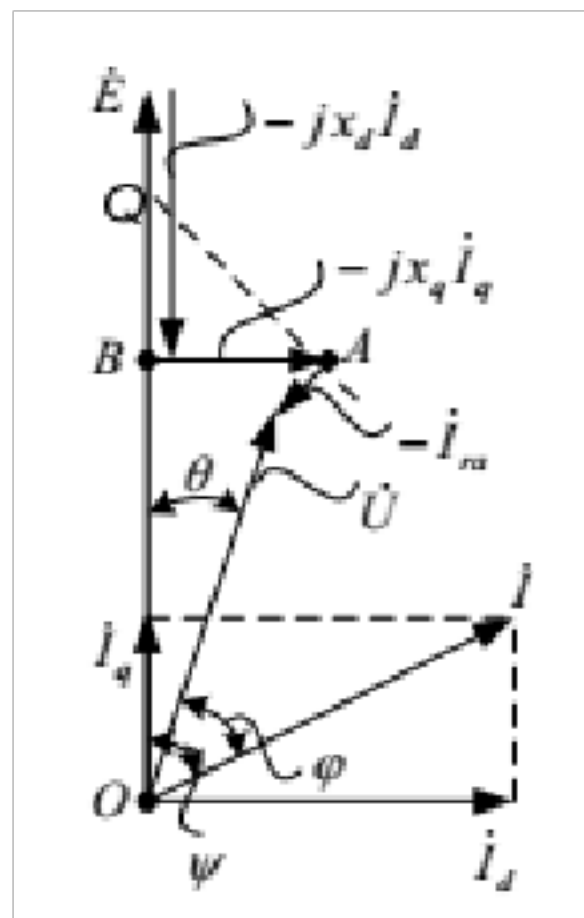


Рисунок 8.2 – Векторная диаграмма Блонделя с учетом синхронных индуктивных сопротивлений

Если в векторах падений напряжений поменять знаки, то получим векторные диаграммы, соответствующие уравнению:

$$\dot{E} = \dot{U} + j\dot{I}_d x_d + j\dot{I}_q x_q + \dot{I} r_a \quad (8.4)$$

Прямая, проведенная из точки A перпендикулярно вектору I до пересечения вектора E (или его продолжения) в точке Q будет отсекать отрезок $AQ = x_q I$.

Угол $QAB = \psi$ (так как имеет стороны перпендикулярные сторонам угла ψ) значит

$$AQ = \frac{AB}{\cos \psi} = \frac{\dot{I}_q x_q}{\cos \psi} = \dot{I} x_q \quad (8.5)$$

Это свойство используется в диаграммах Потье, где по $\dot{I}, \dot{U} \cos \varphi$ и находят $\dot{E}$.

Для неявнополусных машин $x_d = x_q$, поэтому нет необходимости разлагать ток на

...грамма выглядят значительно проще.

Рассмотренные векторные диаграммы справедливы для любого установившегося режима работы синхронного генератора с постоянной степенью

насыщения, т. е. с постоянными X_{ad} и X_{aq} .

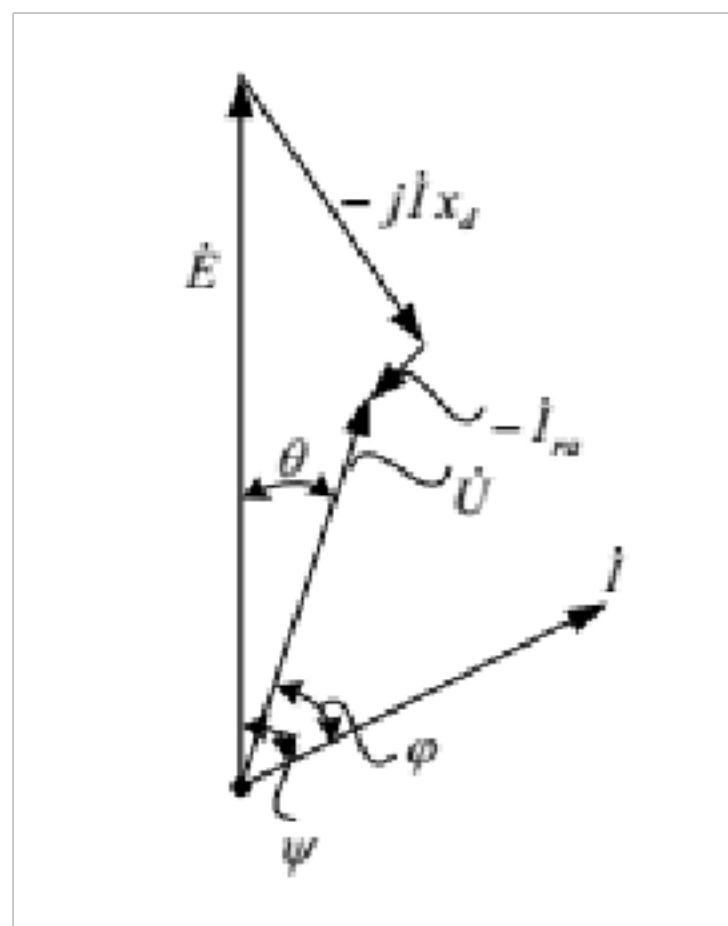


Рисунок 8.3 – Векторная диаграмма неявнополусного СГ

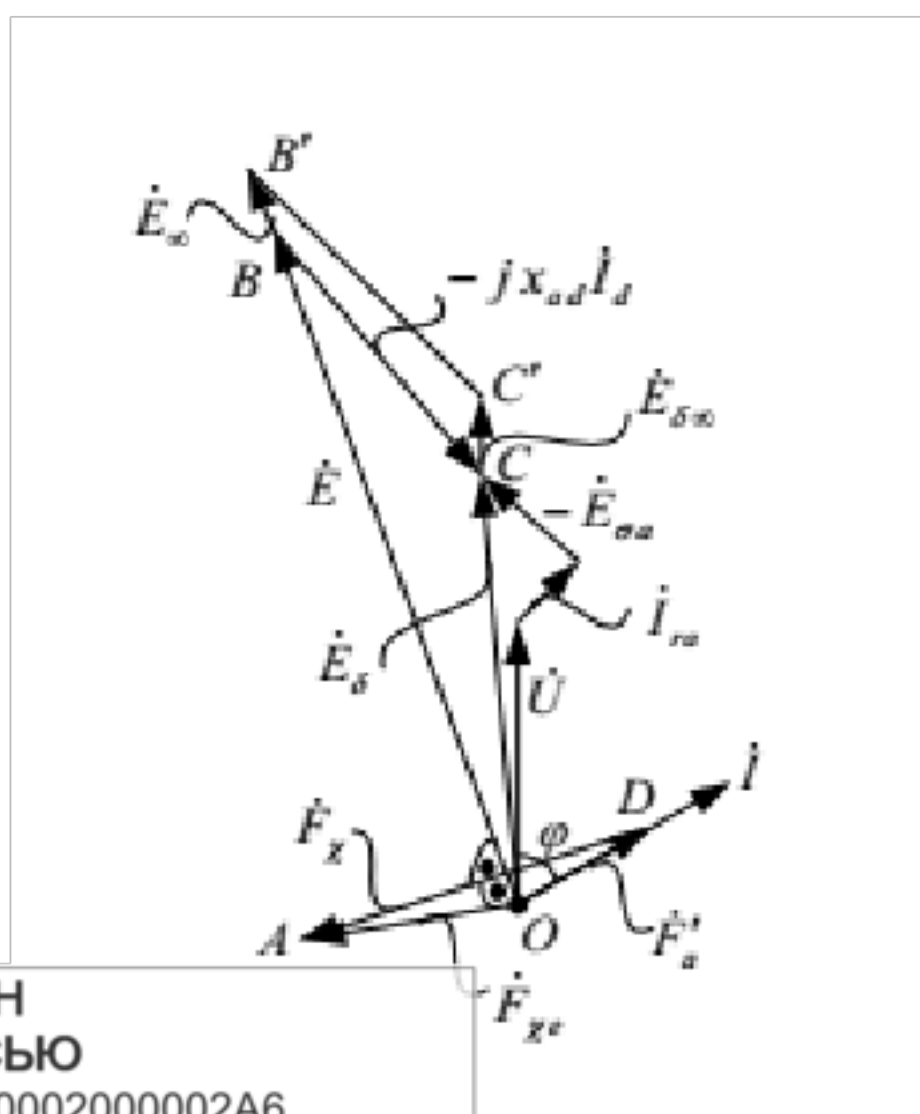
Диаграмма Потье (неявнополусный синхронный генератор)

Как уже говорилось, такой тип диаграмм используется при проектировании и эксплуатации синхронных машин, когда надо определить i_f , необходимый для обеспечения заданных $\dot{U}$, $\dot{I}$, $\cos \varphi$, с учетом насыщения.

Сначала строят $\dot{U}$ и $\dot{I}$, затем $j\dot{I}x_{ad}$ и $\dot{I}r_a$, находят $\dot{E}_s$, необходимую затем для создания режима.

Затем по характеристике холостого хода определяют i_m необходимую для создания $\dot{E}_s$. Затем вычитая из $\dot{F}_{xa}$ н.с. р. я., приведённую к $i_x \dot{F}_a^f$, получим полную н. с. ОВ.

Диаграмма Потье таким образом состоит из двух: векторная диаграмма ЭДС4. Как определить по диаграмме Потье напряжение на зажимах генератора при сбросе нагрузки? и векторная диаграмма намагниченных сил.



ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Рисунок 8.4 – Векторная диаграмма ЭДС Потье

При практическом использовании диаграммы Потье, её совмещают с характеристикой холостого хода.

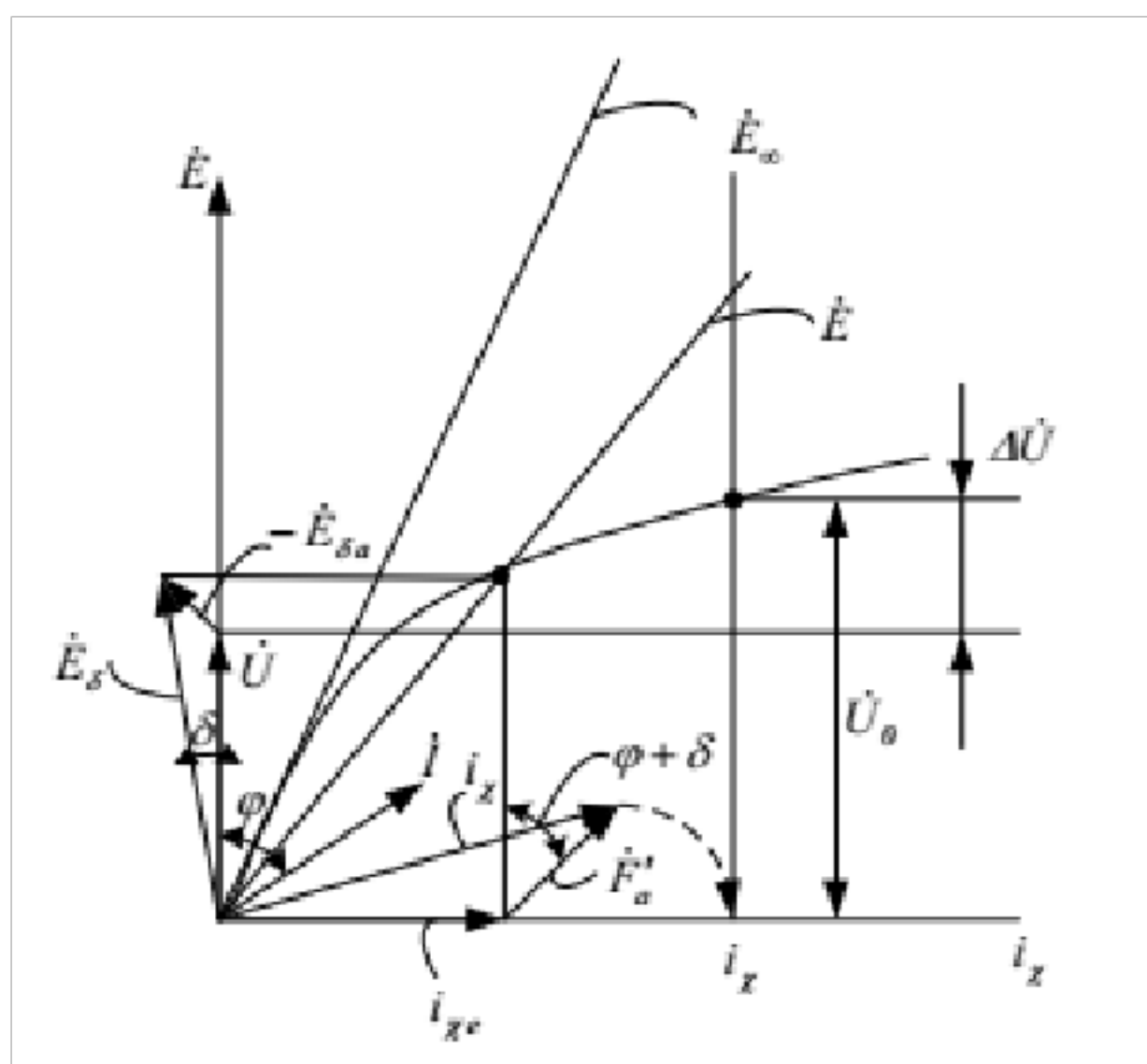


Рисунок 8.5 – Векторная диаграмма намагничивающих сил Потье

При построении принимается $r_a = 0$. Более точные результаты диаграмма даёт, если вместо Диаграмма построена для неявнополюсных машин.

Вектор должен быть перпендикулярен AD (н. с. $\dot{F}_x$). Если из точки С провести прямую перпендикулярную $\dot{I}$, то пересечения её и ОВ даст насыщенное $\dot{E}$, если вместо $\dot{E}_s$ отложить $\dot{E}_{s\infty}$, то аналогичным способом получим $\dot{E}_\infty$.

По совмещенной диаграмме Потье и характеристики холостого хода можно получить значение напряжения на зажимах при сбросе $\dot{U}_0$ ($i_x = \text{const}$) нагрузки и найти изменения напряжения $\Delta \dot{U}$. Разница между $\dot{U}_0$ и $\dot{E}$ при этом имеет место от того, что для режима нагрузки и холостого хода принимается (при определении $\dot{E}$) одна степень насыщения, а на самом деле они различны.

• Контрольные вопросы и задания

1. Что определяю с помощью векторных диаграмм синхронного генератора?
2. Каков порядок построение диаграммы Blondеля?
3. Как выглядит диаграмма Blondеля для неявнополюсного генератора?
4. Порядок построения диаграммы Потье для явнополюсного генератора.

• Задачи

1. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.	1. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.
2. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.	2. Построить векторную диаграмму для явнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

3. Построить векторную диаграмму для неявнополюсного синхронного генератора, имеющего активно-емкостную нагрузку.

4. Построить векторную диаграмму для неявнополюсного синхронного генератора, имеющего активную нагрузку.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

- **Практическое занятие №.10**

Тема. Расчет основных параметров синхронных генераторов

Теоретическая часть.

Номинальные параметры генераторов.

Завод-изготовитель предназначает генератор для определенного длительно допустимого режима работы, который называют номинальным. Этот режим работы характеризуется параметрами, которые носят название номинальных.

Для синхронных электрических машин в установившемся режиме работы имеется строгое соответствие между частотой вращения агрегата n , об/мин, и частотой сети f , Гц:

$$n = 60 f / p \quad (9.1)$$

Номинальное напряжение генератора - это линейное (междуфазное) напряжение обмотки статора в номинальном режиме.

Номинальным током статора генератора называется то значение тока, при котором допускается длительная нормальная работа генератора при номинальных параметрах охлаждения (температура, давление и расход охлаждающего газа и жидкости) и номинальных значениях мощности и напряжения, указанных в паспорте генератора.

Номинальная активная мощность генератора – это наибольшая активная мощность, для длительной работы с которой он предназначен в комплекте с турбиной.

Номинальная активная мощность генератора определяется следующим выражением:

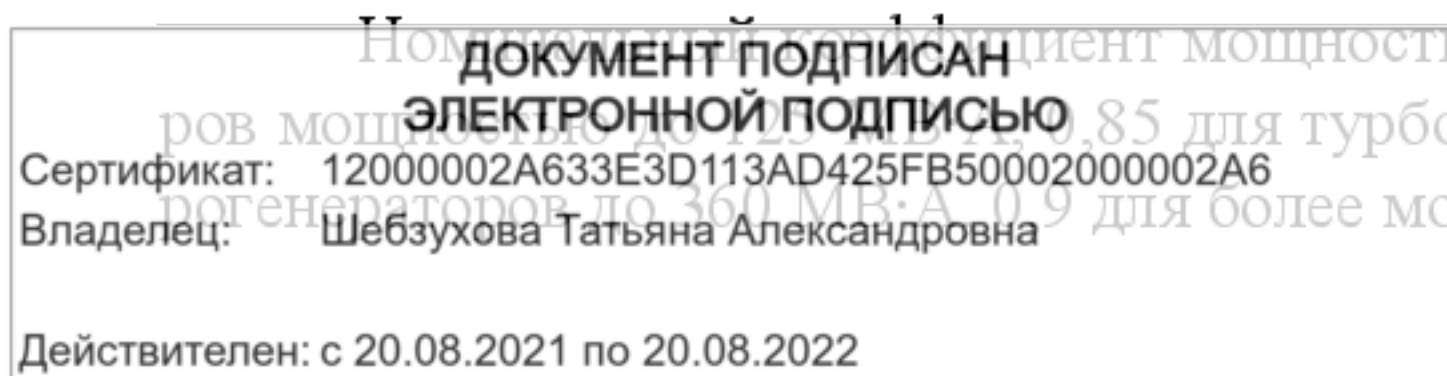
$$P = S \cos \varphi. \quad (9.2)$$

Номинальная полная мощность генератора определяется по следующей формуле:

$$S = \sqrt{3} * U * I \quad (9.3)$$

Номинальный ток ротора – это наибольший ток возбуждения генератора, при котором обеспечивается отдача генератором его номинальной мощности при отклонении напряжения статора в пределах $\pm 5\%$ номинального значения и при номинальном коэффициенте мощности.

Номинальный коэффициент мощности $\cos \varphi$ принимается равным 0,8 для генераторов мощностью до 588 МВ·А и гидрогенераторов до 360 МВ·А, 0,9 для более мощных машин.



Каждый генератор характеризуется также КПД при номинальной нагрузке и номинальном коэффициенте мощности. Для современных генераторов номинальный коэффициент полезного действия колеблется в пределах 96,3 - 98,8 %.

Пример 1. Найти ЭДС, индуцируемую в одной фазе статора генератора переменного тока, если количество витков 24; обмоточный коэффициент 0,9; частота ЭДС 50 Гц, а магнитный поток 0,05 Вб.

Решение:

$$E = 4.44 * f * k_{об} * w * \Phi = 4,44 * 50 * 0,9 * 24 * 0,05 = 239,8 \text{ В}$$

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте понятие номинальных параметров синхронного генератора.
2. В каких пределах колеблется КПД синхронного генератора?
3. Как определить ЭДС фазы обмотки статора синхронного генератора?

•

Задачи

1. Ротор трехфазного синхронного генератора имеет 12 полюсов. Частота напряжения на зажимах генератора $f = 50$ Гц. Полезная мощность приводного двигателя 5 кВт. Определить вращающий момент на валу генератора.

2. Трехфазный синхронный генератор вырабатывает напряжение частотой $f = 50$ Гц. Число полюсов $2p = 2$. Приводной двигатель создает вращающий момент на валу $M_1 = 29$ Нм. Определить полезную мощность приводного двигателя.

3. Определить напряжение на зажимах трехфазного синхронного генератора, работающего в режиме холостого хода, при соединении обмотки статора по схеме «треугольник» и «звезда», если известно, что частота $f = 50$ Гц, число последовательно соединенных витков фазы обмотки статора $w_1 = 180$, обмоточный коэффициент $k_{об1} = 0,92$, максимальное значение магнитного потока одной фазы $\Phi_{max} = 0,012$ Вб.

4. Определить нагрузочный ток турбогенератора при линейном напряжении на зажимах $U_n = 6,3$ кВ и коэффициенте мощности $\cos \varphi = 0,8$, если известны ЭДС возбуждения генератора $E_f = 7,5$ кВ, активное и полное индуктивное сопротивления обмотки якоря $R = 0,235$ Ом, $X_1 = 32,9$ Ом. Обмотка соединена в звезду. Влиянием насыщения пренебречь.

5. Явнополюсный синхронный генератор включен на активно-индуктивную нагрузку $Z_H = 8,8 + j6,6$ Ом. Фазный ток генератора $I = 346,8$ А. Определить ЭДС возбуждения генератора (без учета насыщения), если индуктивное сопротивление обмотки якоря по продольной и поперечной осям: $X_d = 9,89$ Ом, $X_q = 6,03$ Ом. Активное сопротивление обмотки якоря $R = 0,147$ Ом.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

генератор мощностью S_n с напряжением на зажимах U_n (соединенный по схеме «звезда») при частоте тока 50 Гц и частоте вращения n (табл. 18.1). Генератор работает на нагрузку с $\cos \varphi = 0,9$. Требуется определить активную мощность генератора при но-

Таблица 9.1 – Данные к задаче 6

Величины	Варианты									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S_H , кВт·А	330	400	170	470	230	600	780	450	700	500
U_{1H} , кВ	6,3	3,2	0,4	6,3	0,7	3,2	06,3	0,4	6,3	3,2
η_H , %	92	92	90	91	90	93	93	91	93	92
n_1 об/мин	1000	750	600	1000	600	500	1000	500	1000	600

•

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

• **Практическое занятие №.11**

Тема. Расчет основных параметров синхронных двигателей

Теоретическая часть.

Электромагнитный момент СД

Из принципа действия синхронного двигателя запишем, что сила, действующая на проводник с током в поле:

$$F_{эм} = B_{\delta} l l. \quad (10.1)$$

Если проводник уложен в статоре диаметром D_{α} , то $F_{эм}$ создает электромагнитный момент:

$$M_{эм} = F_{эм} D_{\alpha} / 2 = B_{\delta} l l D_{\alpha} / 2 \quad (10.2)$$

являющийся в двигателе вращающим моментом. Следует отметить, что в машинах переменного тока вращающий момент создается только активной составляющей тока.

$$M_{эм} = B_{\delta} * l * I * \cos \varphi * D_{\alpha} / 2 \quad (10.3)$$

Поскольку уравнение угловой характеристики для СМ имеет вид приведенный ранее, то

$$M_{эм} = \frac{mEU}{\Omega x_d} \sin \theta + \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta \quad (10.4)$$

Из выражения (20.4) можно определить: максимальный электромагнитный момент:

$$M_{эм\max} = \frac{mEU}{\Omega x_d} \quad (10.5)$$

синхронизирующий момент:

$$M_{см} = \frac{dM_{эм}}{d\theta} = \frac{mEU}{\Omega x_d} \cos \theta + \frac{mU^2}{\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta \quad (10.6)$$

коэффициент статической перегружаемости:

$$K_n = M_{эм\max} / M_{эм} \quad (10.7)$$

Определяется номинальным режимом работы ($M_{эм} = M_{ст}$ статическому моменту

нагрузки)
ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен с 20.08.2021 по 20.08.2022

Из выражения (20.4) можно определить реактивный момент (невозбужденной

$$M_{\text{эмп}} = \frac{mU^2}{2\Omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\Theta \quad (10.8)$$

который существует из-за магнитной несимметрии явнополюсной СМ, если $x_d = x_q$, $M_{\text{эмп}} = 0$.

Физически возникновение реактивного момента в явнополюсной машине объясняется тем, что ротор (невозбужденный) стремится занять по отношению к вращающемуся полю положение, при котором сопротивление магнитного потока и энергия поля минимальны.

Если $M_{\text{см}}=0$, то $M_{\text{эм}}=0$ и $\Theta=0$, т.е. ось ротора и поля совпадают. Если вал нагружен, т.е. $M_{\text{эм}}$.

Пример 1. Трехфазный синхронный двигатель номинальной мощностью $P_n = 575$ кВт, числом полюсов $2p = 6$ работает от сети промышленной частоты напряжением $U_n = 6$ кВ. Перегрузочная способность двигателя $M_{\text{max}}/M_n = 1,5$, кратность пускового тока $I_n/I_n = 5$, кратность пускового момента $M_n/M_n = 1,4$. Схема соединения обмотки статора – «звезда». В номинальном режиме работы двигатель имеет коэффициент полезного действия $\eta_n = 93\%$, коэффициент мощности при опережающем токе статора $\cos \varphi_n = 0,8$. Определить: 1) потребляемую двигателем из сети активную мощность P_1 и ток I_n , суммарные потери мощности ΣP , вращающий момент двигателя M_n при номинальной нагрузке; 2) пусковой ток I_n и пусковой момент M_n ; максимальный момент M_{max} , при котором двигатель выпадает из синхронизма.

Решение:

Потребляемая двигателем из сети активная мощность:

$$P_1 = \frac{P_n}{\eta_n} = \frac{575}{0,93} = 618 \text{ кВт.}$$

Потребляемый из сети ток:

$$I_n = \frac{S_n}{\sqrt{3} * U_n} = \frac{P_1}{\sqrt{3} * U * \cos \varphi_n} = \frac{618}{\sqrt{3} * 6 * 0,8} = 74,5 \text{ А.}$$

Номинальная частота вращения:

$$n_n = \frac{60 * f}{p} = \frac{60 * 50}{3} = 1000 \text{ об/мин}$$

Развиваемый двигателем вращающий момент:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

$$n_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{2\pi \cdot n_{\text{н}}} = \frac{575 \cdot 10^3}{2\pi \cdot (1000/60)} = 5494 \text{ Н} \cdot \text{м}$$

Суммарные потери мощности в двигателе:

$$\Sigma P = P_1 + P_{\text{н}} = 618 + 575 = 43 \text{ кВт.}$$

Пусковой момент двигателя:

$$M_{\text{н}} = 1,4M_{\text{н}} = 1,4 \cdot 5494 = 7691 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Пусковой ток двигателя:

$$I_{\text{н}} = 5I_{\text{н}} = 5 \cdot 74,5 = 372 \text{ А.}$$

Максимальный момент двигателя, Нм:

$$M_{\text{max}} = 1,5M_{\text{н}} = 1,5 \cdot 5494 = 8240 \text{ Н} \cdot \text{м.}$$

Контрольные вопросы и задания

1. Дайте определение электромагнитного момента синхронного двигателя.
2. Каков физический смысл реактивного момента синхронного двигателя?
3. Как определить пусковой ток и пусковой момент синхронного двигателя?
4. Что такое коэффициент статической перегружаемости?

•

Задачи

1. Трехфазный синхронный двигатель номинальной мощностью $P_{\text{н}}$ и числом полюсов $2p$ работает от сети напряжением $U_{1\text{н}}$ (обмотка статора соединена «звездой»). КПД двигателя $\eta_{\text{н}}$, коэффициент мощности $\cos \varphi_{\text{н}}$ при опережающем токе статора. Перегрузочная способность двигателя β , а его пусковые параметры определены кратностью пускового тока $I_{\text{н}}/I_{\text{н}}$ и кратностью пускового момента $M_{\text{н}}/M_{\text{н}}$. Значения этих величин приведены в таблице 20.1. Требуется определить: потребляемые двигателем из сети активную мощность $P_{1\text{н}}$ и ток $I_{1\text{н}}$, развиваемый двигателем при номинальной нагрузке вращающий момент $M_{\text{н}}$, суммарные потери мощности ΣP , пусковой момент $M_{\text{н}}$ и пусковой ток $I_{\text{н}}$, а также вращающий момент M_{max} , при котором двигатель выпадает из синхронизма.

Таблица 20.1 – Данные к задаче 1

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Величины

Варианты	P_n , кВт	U_{1n} , кВ	$2p$	$\cos \varphi_n$	η_n , %	I_n/I_n	M_n/M_n	$M_{\max}/M_n$
1	575	6,0	16	0,8	93	5,0	1,4	1,5
2	600	3,0	10	0,9	92	5,5	1,7	1,5
3	325	3,0	8	0,9	90	4,5	1,7	1,6
4	60	0,38	6	0,8	89	4,5	2,2	1,6
5	160	0,38	6	0,8	90	4,8	2,4	1,5

2. Трехфазный синхронный двигатель в номинальном режиме имеет технические данные: мощность $P_n = 600$ кВт, напряжение $U_n = 3000$ В, коэффициент полезного действия $\eta_n = 93$ %, коэффициент мощности $\cos \varphi_n = 0,8$, угол нагрузки $\alpha = 30^\circ$. Определить потребляемый из сети ток и перегрузочную способность двигателя.

3. Трехфазный синхронный двигатель номинальной мощностью P_n и числом полюсов $2p$ работает от сети напряжением U_{1n} (обмотка статора соединена «звездой»). КПД двигателя η_n , коэффициент мощности $\cos \varphi_n$ при опережающем токе статора. Перегрузочная способность двигателя – λ , а его пусковые параметры определены кратностью пускового тока I_n/I_n и кратностью пускового момента M_n/M_n . Значения этих величин приведены в таблице 20.2. Требуется определить: потребляемые двигателем из сети активную мощность P_{1n} и ток I_{1n} , развиваемый двигателем при номинальной нагрузке вращающий момент M_n , суммарные потери мощности ΣP , пусковой момент M_n и пусковой ток I_n , а также вращающий момент $M_{\max}$, при котором двигатель выпадает из синхронизма.

Таблица 10.2 – Данные к задаче 3

Варианты	Величины							
	P_n , кВт	U_{1n} , кВ	$2p$	$\cos \varphi_n$	η_n , %	$\frac{I_n}{I_n}$	$\frac{M_n}{M_n}$	$\frac{M_{\max}}{M_n}$
1	575	6,0	16	0,8	93	500	1,4	1,5
2	600	3,0	10	0,9	92	505	1,7	1,5
3	325	3,0	8	0,9	90	405	1,7	1,6
4	60	0,38	6	0,8	89	4,5	2,2	1,6
5	160	0,38	6	0,8	90	4,8	2,4	1,5

Рекомендуемая литература

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] :

учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский государственный университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
 Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

•

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ОБРАЗОВАНИЯ

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«СЕВЕРО-КАВКАЗСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Пятигорский институт (филиал) СКФУ

Методические указания

по организации самостоятельной работы обучающихся
по дисциплине «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»
для студентов направления подготовки
13.03.02 Электроэнергетика и электротехника

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Содержание

Введение

- 1 Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ»
- 2 План-график выполнения самостоятельной работы
- 3 Контрольные точки и виды отчетности по ним
- 4 Методические рекомендации по изучению теоретического материала
- 5 Список рекомендуемой литературы.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Введение

Самостоятельная работа – планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Целью самостоятельной работы студентов является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности. Самостоятельная работа студентов способствует развитию самостоятельности, ответственности и организованности, творческого подхода к решению проблем учебного и профессионального уровня.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Общая характеристика самостоятельной работы обучающегося при изучении дисциплины «Электрические машины»

Самостоятельная работа - планируемая учебная, учебно-исследовательская, научно-исследовательская работа студентов, выполняемая во внеаудиторное (аудиторное) время по заданию и при методическом руководстве преподавателя, но без его непосредственного участия (при частичном непосредственном участии преподавателя, оставляющем ведущую роль за работой студентов).

Самостоятельная работа студентов в ВУЗе является важным видом учебной и научной деятельности студента. Самостоятельная работа студентов играет значительную роль в рейтинговой технологии обучения. В связи с этим, обучение в ВУЗе включает в себя две, практически одинаковые по объему и взаимовлиянию части – процесса обучения и процесса самообучения. Поэтому СРС должна стать эффективной и целенаправленной работой студента.

К современному специалисту общество предъявляет достаточно широкий перечень требований, среди которых немаловажное значение имеет наличие у выпускников определенных способностей и умения самостоятельно добывать знания из различных источников, систематизировать полученную информацию, давать оценку конкретной финансовой ситуации. Формирование такого умения происходит в течение всего периода обучения через участие студентов в практических занятиях, выполнение контрольных заданий и тестов, написание курсовых и выпускных квалификационных работ. При этом самостоятельная работа студентов играет решающую роль в ходе всего учебного процесса.

Ведущая цель организации и осуществления СРС должна совпадать с целью обучения студента – подготовкой специалиста и бакалавра с высшим образованием. При организации СРС важным и необходимым условием становятся формирование умения самостоятельной работы для приобретения знаний, навыков и возможности организации учебной и научной деятельности.

Формы самостоятельной работы студентов разнообразны. В соответствии с рабочей программой дисциплины предусмотрены следующие виды самостоятельной работы студента:

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ	
Сертификат:	12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец:	Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022	

Цель самостоятельного изучения литературы – самостоятельное овладение знаниями, опытом исследовательской деятельности.

Задачами самостоятельного изучения литературы являются:

- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов.

Цель самостоятельного решения задач - овладение профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю будущей деятельности.

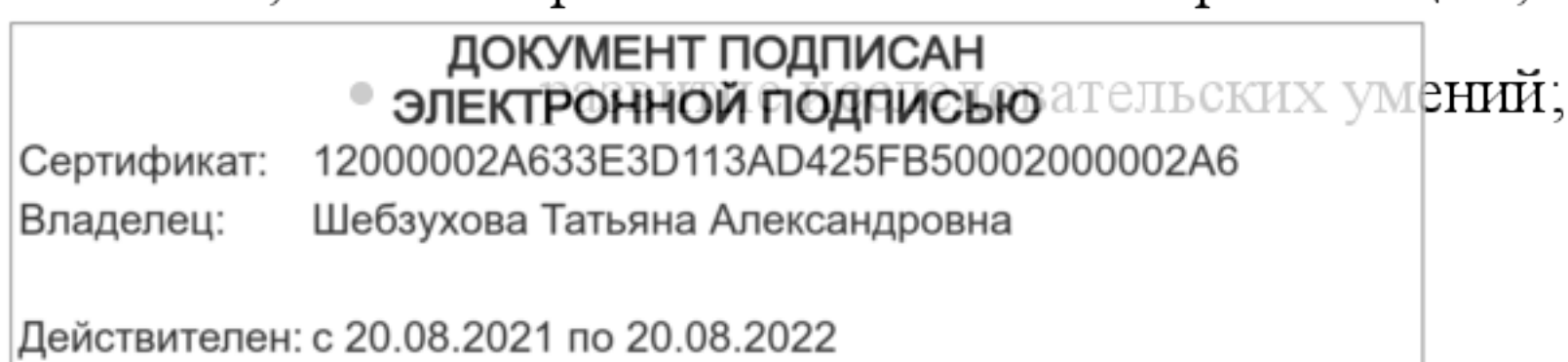
Задачами самостоятельного решения задач являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;
- развитие исследовательских умений.

Целью самостоятельного выполнения контрольной работы по дисциплине является овладение фундаментальными знаниями, профессиональными умениями и навыками деятельности по профилю, опытом творческой, исследовательской деятельности.

Задачами данного вида самостоятельной работы студента являются:

- систематизация и закрепление полученных теоретических знаний и практических умений студентов;
- углубление и расширение теоретических знаний;
- формирование умений использовать нормативную, правовую, справочную документацию и специальную литературу;
- развитие познавательных способностей и активности студентов: творческой инициативы, самостоятельности, ответственности и организованности;
- формирование самостоятельности мышления, способностей к саморазвитию, самосовершенствованию и самореализации;



- использование материала, собранного и полученного в ходе самостоятельных занятий на семинарах, на практических и лабораторных занятиях, при написании контрольной работы.

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

В результате освоения дисциплины формируются следующий перечень планируемых результатов обучения по дисциплине, соотнесённых с планируемыми результатами освоения образовательной программы:

Код, формулировка компетенции	Код, формулировка индикатора	Планируемые результаты обучения по дисциплине (модулю), характеризующие этапы формирования компетенций, индикаторов
ОПК-4 Способен использовать методы анализа и моделирования электрических цепей и электрических машин;	ИД-5 _{ОПК-4} Анализирует установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин, использует знание их режимов работы и характеристик;	Знает принцип действия современных типов электрических машин, особенности их конструкции, уравнения, Умеет анализировать установившиеся режимы работы трансформаторов и электрических машин. Владеет навыками моделирования электрических цепей
ПК-1 Способен участвовать в проектировании систем электроснабжения.	ИД-3 _{ПК-1} Обосновывает выбор параметров электрооборудования систем электроснабжения, учитывая технические ограничения	Знает схемы замещения и характеристики, методы анализа и моделирования электрических машин Умеет использовать полученные знания при решении практических задач по проектированию, испытаниям и эксплуатации электрических машин. Владеет навыками определения основных параметров электрических машин

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

План-график выполнения самостоятельной работы

Коды реализуемых компетенций, индикатора(ов)	Вид деятельности студентов	Средства и технологии оценки	Объем часов, в том числе		
			СРС	Контактная работа с преподавателем	Всего
4 семестр					
ОПК-4 ИД-5 _{ОПК-4} ПК-1	Самостоятельное изучение литературы по темам №1-18	Собеседование	15,795	1,755	17,55
	Подготовка к лекциям	Собеседование	2,43	0,27	2,7
	Подготовка к практическим занятиям	Собеседование	2,43	0,27	2,7
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	3,645	0,405	4,05
Итого за 4 семестр:			24,3	2,7	27
5 семестр					
ОПК-4 ИД-5 _{ОПК-4} ПК-1	Самостоятельное изучение литературы по темам №18-36	Собеседование	4,86	0,54	5,4
	Подготовка к лекциям	Собеседование	2,43	0,27	2,7
	Подготовка к практическим занятиям	Собеседование	4,86	0,54	5,4
	Подготовка к лабораторным занятиям	Собеседование	3,645	0,405	4,05
Итого за 5 семестр:			36,45	4,05	40,5
Итого:			60,75	6,75	67,5

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Контрольные точки и виды отчетности по ним

№ п/п	Вид деятельности студентов	Сроки выполнения	Количество баллов
4 семестр			
1.	Практическое занятие № 2	6 неделя	25
2.	Лабораторное занятие № 5	10 неделя	15
3.	Практическое занятие № 8	16 неделя	15
	Итого за 4 семестр		55
5 семестр			
4.	Практическое занятие № 11	6 неделя	25
5.	Лабораторное занятие № 15	10 неделя	15
6.	Практическое занятие № 17	16 неделя	15
	Итого за 5 семестр		55

Максимально возможный балл за весь текущий контроль Максимально возможный балл за весь текущий контроль устанавливается равным 55. Текущее контрольное мероприятие считается сданным, если студент получил за него не менее 60% от установленного для этого контроля максимального балла. Рейтинговый балл, выставаемый студенту за текущее контрольное мероприятие, сданное студентом в установленные графиком контрольных мероприятий сроки, определяется следующим образом:

Уровень выполнения контрольного задания	Рейтинговый балл (в % от максимального балла за контрольное задание)
Отличный	100
Хороший	80
Удовлетворительный	60
Неудовлетворительный	0

**ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ**

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Методические рекомендации по изучению теоретического материала

Самостоятельная работа студента начинается с внимательного ознакомления с содержанием учебного курса.

Изучение каждой темы следует начинать с внимательного ознакомления с набором вопросов. Они ориентируют студента, показывают, что он должен знать по данной теме. Вопросы темы как бы накладываются на соответствующую главу избранного учебника или учебного пособия. В итоге должно быть ясным, какие вопросы темы учебного курса и с какой глубиной раскрыты в конкретном учебном материале, а какие вообще опущены. Требуется творческое отношение и к самому содержанию дисциплины.

Вопросы, составляющие ее содержание, обладают разной степенью важности. Есть вопросы, выполняющие функцию логической связки содержания темы и всего курса, имеются вопросы описательного или разъяснительного характера, а также исторического экскурса в область изучаемой дисциплины. Все эти вопросы не составляют сути понятийного, концептуального содержания темы, но необходимы для целостного восприятия изучаемых проблем.

Изучаемая дисциплина имеет свой категориально-понятийный аппарат. Научные понятия — это та база, на которой строится каждая наука. Понятия — узловые, опорные пункты как научного, так и учебного познания, логические ступени движения в учебе от простого к сложному, от явления к сущности. Без ясного понимания понятий учеба крайне затрудняется, а содержание приобретенных знаний становится тусклым, расплывчатым.

Студент должен понимать, что самостоятельное овладение знаниями является главным, определяющим. Высшая школа создает для этого необходимые условия, помогает будущему высококвалифицированному специалисту овладеть технологией самостоятельного производства знаний.

В самостоятельной работе студентам приходится использовать литературу различных видов: первоисточники, монографии, научные сборники, хрестоматии, учебники, учебные пособия, журналы и др. Изучение курса предполагает знакомство студентов с большим объемом научной и учебной литературы, что, в свою очередь, порождает необходимость рационально-критического подхода к изучаемым источникам.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ
Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6
Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна
Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022

Чтобы не «утонуть» в огромном объеме рекомендованных ему для изучения источников, студент, прежде всего, должен научиться правильно их читать. Правильное чтение

рекомендованных источников предполагает следование нескольким несложным, но весьма полезным правилам.

Предварительный просмотр книги включает ознакомление с титульным листом книги, аннотацией, предисловием, оглавлением. При ознакомлении с оглавлением необходимо выделить разделы, главы, параграфы, представляющие для вас интерес, бегло их просмотреть, найти места, относящиеся к теме (абзацы, страницы, параграфы), и познакомиться с ними в общих чертах.

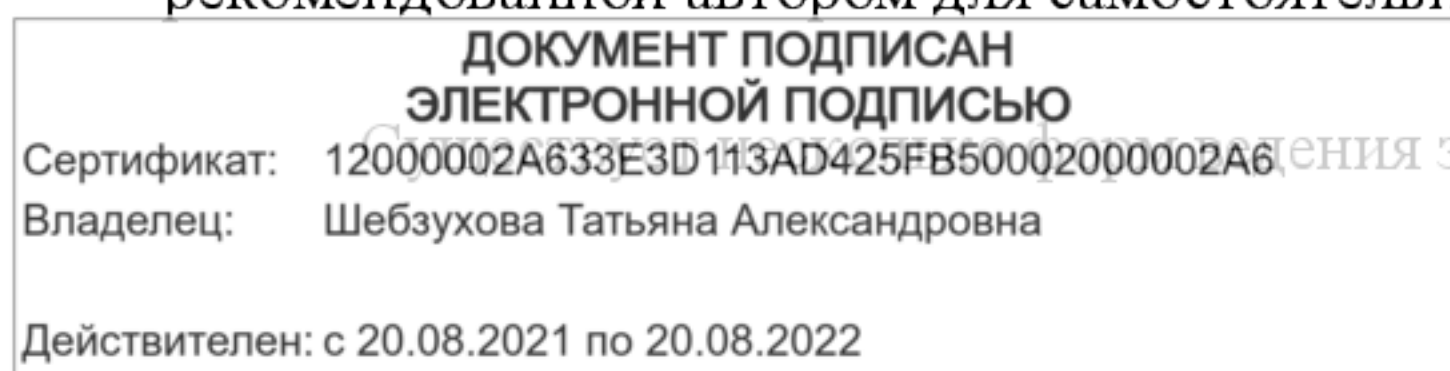
Научные издания сопровождаются различными вспомогательными материалами — научным аппаратом, поэтому важно знать, из каких основных элементов он состоит, каковы его функции.

Знакомство с книгой лучше всего начинать с изучения аннотации — краткой характеристики книги, раскрывающей ее содержание, идейную, тематическую и жанровую направленность, сведения об авторе, назначение и другие особенности. Аннотация помогает составить предварительное мнение о книге.

Глубже понять содержание книги позволяют вступительная статья, в которой дается оценка содержания книги, затрагиваемой в ней проблематики, содержится информация о жизненной и творческой биографии автора, высказываются полемические замечания, разъясняются отдельные положения книги, даются комментарии и т.д. Вот почему знакомство с вступительной статьей представляется очень важным: оно помогает студенту сориентироваться в тексте работы, обратить внимание на ее наиболее ценные и важные разделы.

Той же цели содействует знакомство с оглавлением, предисловием, послесловием. Весьма полезными элементами научного аппарата являются сноски, комментарии, таблицы, графики, списки литературы. Они не только иллюстрируют отдельные положения книги или статьи, но и сами по себе являются дополнительным источником информации для читателя.

Если читателя заинтересовала какая-то высказанная автором мысль, не нашедшая подробного освещения в данном источнике, он может обратиться к тексту источника, упоминаемого в сноске, либо к источнику, который он может найти в списке литературы, рекомендованной автором для самостоятельного изучения.



записей:

— план (простой и развернутый) — наиболее краткая форма записи прочитанного, представляющая собой перечень вопросов, рассматриваемых в книге или статье. Развернутый план представляет собой более подробную запись прочитанного, с детализацией отдельных положений и выводов, с выпиской цитат, статистических данных и т.д. Развернутый план — неоценимый помощник при выступлении с докладом на конкретную тему на семинаре, конференции;

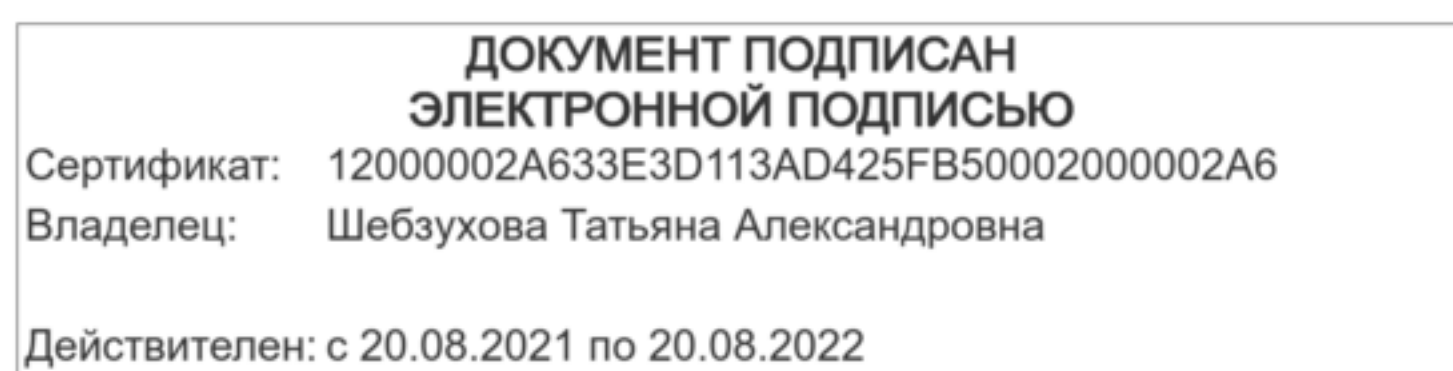
— тезисы — кратко сформулированные положения, основные положения книги, статьи. Как правило, тезисы составляются после предварительного знакомства с текстом источника, при его повторном прочтении. Они помогают запомнить и систематизировать информацию.

Составление конспектов

Большую роль в усвоении и повторении пройденного материала играет хороший конспект, содержащий основные идеи прочитанного в учебнике и услышанного в лекции. Конспект — это, по существу, набросок, развернутый план связного рассказа по основным вопросам темы.

В какой-то мере конспект рассчитан (в зависимости от индивидуальных особенностей студента) не только на интеллектуальную и эмоциональную, но и на зрительную память, причем текст конспекта нередко ассоциируется еще и с текстом учебника или записью лекции. Поэтому легче запоминается содержание конспектов, написанных разборчиво, с подчеркиванием или выделением разрядкой ключевых слов и фраз.

Самостоятельно изученные темы предоставляются преподавателю в форме конспекта, по которому происходит собеседование. Теоретические темы курса (отдельные вопросы), выносимые на самостоятельное изучение, представлены ниже.



Список рекомендуемой литературы

Перечень основной литературы:

1. Игнатович В.М. Электрические машины и трансформаторы [Электронный ресурс] : учебное пособие / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — Электрон. текстовые данные. — Томск: Томский политехнический университет, 2013. — 182 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/34738.html>
2. Дробов А.В. Электрические машины [Электронный ресурс] : учебное пособие / А.В. Дробов, В.Н. Галушко. — Электрон. текстовые данные. — Минск: Республиканский институт профессионального образования (РИПО), 2015. — 292 с. — 978-985-503-540-5. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/67795.html>

Перечень дополнительной литературы:

1. Электрические машины [Электронный ресурс] : сборник задач / В. И. Парамонова. — Электрон. текстовые данные. — М. : Московская государственная академия водного транспорта, 2015. — 72 с. — 2227-8397. — Режим доступа: <http://www.iprbookshop.ru/46905.html>

Перечень ресурсов информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

1. <http://www.biblioclub.ru> -ЭБС "Университетская библиотека онлайн"
2. <http://www.iprbookshop.ru/> - Электронно- библиотечная система IPRbooks
3. <http://elibrary.ru>.

ДОКУМЕНТ ПОДПИСАН
ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДПИСЬЮ

Сертификат: 12000002A633E3D113AD425FB50002000002A6

Владелец: Шебзухова Татьяна Александровна

Действителен: с 20.08.2021 по 20.08.2022