

**В.Е. Высоцкий**

**С У Д О В Ы Е  
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА  
И ТРАНСФОРМАТОРЫ**

**Учебно-методическое пособие  
по самостоятельной работе студентов**

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное  
учреждение высшего образования  
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

МОРСКОЙ ИНСТИТУТ

Кафедра «Судовое электрооборудование»

**В.Е. Высоцкий**

# **С У Д О В Ы Е ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА И ТРАНСФОРМАТОРЫ**

**Учебно-методическое пособие  
по самостоятельной работе студентов**

Севастополь  
СевГУ  
2024

УДК [621.313.3:629.5.064.5](076)

ББК31.261.6:39.46я73

В93

**Р е ц е н з е н т ы :**

**Л.А. Краснодубец** – д-р техн. наук, профессор,  
профессор кафедры «Судовое электрооборудование»

**В.М. Завьялов** – д-р техн. наук, доцент, заведующий кафедрой  
«Электроэнергетические системы атомных станций»

**Высоцкий В.Е.**

**В93** Судовые электрические машины постоянного тока и трансформаторы: учебно-методическое пособие по самостоятельной работе студентов / В.Е. Высоцкий; Севастопольский государственный университет, Морской институт, кафедра «Судовое электрооборудование». – Севастополь: СевГУ, 2024. – 54 с.: ил., табл. – Текст : электронный.

Учебно-методическое пособие включает в себя основные положения, относящиеся к целям и задачам раздела курса, наименованию тем и их краткому содержанию, методическим рекомендациям, нормам времени на СРС. В пособии содержится информация о выполнении и оформлении заданий, в ходе проведения практических занятий по машинам постоянного тока и трансформаторам с примерами расчетов.

Даны рекомендации по проведению расчетов и оформлению графической части заданий.

Предназначено для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» одноименной специализации очной и заочной форм обучения. Также может быть полезно для обучения студентов специальности 26.05.06 «Эксплуатация судовых энергетических установок» по курсу «Общая электротехника и электроника» и слушателей учебных центров подготовки и аттестации плавсостава из числа инженерно-технических работников, а также инженерам-электромеханикам и электроэнергетикам.

УДК [621.313.3:629.5.064.5](076)

ББК 31.261.6:39.46я73

Рассмотрено и одобрено на заседании кафедры «Судовое электрооборудование» Морского института ФГАОУ «Севастопольский государственный университет», протокол № 9 от 03 апреля 2024 г.

© Высоцкий В. Е., 2024  
© ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет», 2024

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                                                                                        | 4  |
| 1. СТРУКТУРА, СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛОВ И ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ<br>К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ (СРС).....                                     | 5  |
| 1.1. Структура разделов «Судовые электрические машины постоянного тока» и «Судовые трансформаторы»<br>дисциплины «Судовые электрические машины»..... | 5  |
| 1.2. Содержание самостоятельной работы и перечень учебно-методического обеспечения для студентов по<br>дисциплине.....                               | 5  |
| 1.2.1. Самостоятельная работа.....                                                                                                                   | 5  |
| 1.2.2. Рефераты.....                                                                                                                                 | 6  |
| 1.2.3. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы.....                                                                                   | 7  |
| 1.3. Подготовка студентов к контролю успеваемости по дисциплине.....                                                                                 | 8  |
| 1.3.1. Типовые вопросы по темам.....                                                                                                                 | 8  |
| 1.3.2. Перечень контрольных вопросов к подготовке лабораторных работ.....                                                                            | 12 |
| 1.4. Информационное обеспечение самостоятельной работы.....                                                                                          | 15 |
| 1.4.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для самостоятельной работы над<br>разделом дисциплины.....                         | 15 |
| 1.4.2. Перечень ресурсов информационно-коммуникационной сети «Интернет».....                                                                         | 16 |
| 1.5. Методические указания к самостоятельной работе.....                                                                                             | 17 |
| 1.5.1. Самостоятельное овладение учебным материалом как способ организации учебной деятельности<br>студентов.....                                    | 18 |
| 1.5.2. Методические рекомендации по СРС.....                                                                                                         | 19 |
| 2. ЗАДАЧИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ТЕМЕ «СУДОВЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА»:<br>ЗАДАНИЯ, МЕТОДИКА, ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ .....                                | 21 |
| 2.1. Методика и задания, таблицы исходных данных для выполнения практических занятий по разделу<br>«Судовые машины постоянного тока».....            | 21 |
| 2.2. Примеры решения задач практических занятий по разделу «Судовые машины постоянного тока».....                                                    | 28 |
| 3. ЗАДАЧИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО ТЕМЕ «СУДОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ»: ЗАДАНИЯ,<br>МЕТОДИКА, ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ .....                                         | 39 |
| 3.1. Методика и задания, таблицы исходных данных для выполнения практических занятий по разделу<br>«Судовые трансформаторы» .....                    | 39 |
| 3.2. Примеры решения задач практических занятий по разделу «Судовые трансформаторы».....                                                             | 42 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ.....                                                                                                                                      | 47 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ.....                                                                                                                | 48 |
| ПРИЛОЖЕНИЕ.....                                                                                                                                      | 49 |

## ВВЕДЕНИЕ

**Целью преподавания разделов «Судовые электрические машины постоянного тока» и «Судовые трансформаторы»** дисциплины «Судовые электрические машины» является формирование у студентов:

- единого мировоззренческого подхода к сущности физических процессов и взаимодействий в электромеханических преобразователях энергии - машинах постоянного тока и в электромагнитных преобразователях переменного тока – трансформаторах;

- общности в методах составления уравнений электрического равновесия, схем замещения, векторных диаграмм, построения характеристик и проведения расчетов, а также в вопросах эксплуатации и экспериментальных исследований судовых электрических машин постоянного тока и трансформаторов;

*Задачи изучения* разделов «Судовые электрические машины постоянного тока» и «Судовые трансформаторы» дисциплины «Судовые электрические машины» охватывают теоретический, познавательный и практический компоненты деятельности. В них входит формирование знаний, навыков и умений.

Студент по окончании обучения должен

*знать:*

- физические электромагнитные, электромеханические и энергетические процессы и явления, происходящие в различных режимах работы электрических машин постоянного тока и трансформаторов, различные способы их представления на основе математических описаний, энергетических, векторных диаграмм, аналитических выражений характеристик и схем замещения;

- общую компоновку, устройство и применяемые материалы для активных, изоляционных и конструктивных частей судовых электрических машин постоянного тока и трансформаторов;

- принципы построения обмоточных структур электрических машин постоянного тока различных типов, устройство и технологию изготовления и ремонта обмоток, принципиальные схемы плоскостных разверток и эскизов обмоток, а также конструктивные и технологические схемы их укладки;

- основные положения, задачи и обязанности электротехнического персонала, изложенные в требованиях к технической эксплуатации судовых электрических машин постоянного тока и трансформаторов;

*уметь:*

- составлять и решать уравнения, описывающие процессы в электромеханических преобразователях постоянного тока и электромагнитных преобразователях переменного тока в установившихся и переходных режимах, исходя из основных законов физики электричества и магнетизма, электромеханики и методов математического анализа;

- формулировать задачи для исследования электромеханических и электромагнитных преобразователей энергии постоянного и переменного тока;

- технически использовать судовые электрические машины постоянного тока и трансформаторы для электроэнергетических комплексов и электропривода, осуществлять ввод и вывод из действия генераторов постоянного тока при автономной и параллельной работе, электромеханических преобразователей систем управления движением и навигации;

- контролировать степень нагрева обмоток и состояние коллекторно-щеточного контакта судовых машин постоянного тока, а также систем щеточного возбуждения судовых синхронных машин;

- осуществлять проверку правильности включения обмоток электрических машин постоянного тока, трансформаторов и определять их повреждения;

*владеть:*

- методами определения характеристик и параметров электрических машин постоянного тока и трансформаторов;

- способами количественного оценивания изменений электромагнитных и механических переменных, прогнозирования функционирования электрической машины постоянного тока и трансформатора при изменении этих переменных, а также управляющих и возмущающих воздействий;

- методами контроля и поддержания на требуемом уровне сопротивления изоляции судовых электрических машин постоянного тока и трансформаторов;

- методами контроля воздушного зазора, состояния подшипниковых узлов, вентиляционных систем и монтажных соединений, виброактивности и шума;

- методами контроля состояния систем, обеспечивающих охлаждение судовых электрических машин постоянного тока и трансформаторов;

- технологией сборки и разборки в целом, замены подшипниковых узлов судовых электрических машин, технологией сборки и разборки щеточно-коллекторных узлов скользящего контакта в машинах постоянного тока, сборки разборки магнитопроводов и обмоточных систем трансформаторов.

**Объектом или областью изучения** является электромеханическое и трансформаторное оборудование судов морского, речного, рыбопромыслового, технического и специализированного флотов, кораблей и военно- вспомогательных судов, кораблей и судов федеральных органов исполнительной власти, в том числе электрооборудование и средства автоматики ядерных энергетических установок, буровых платформ, плавучих дизельных и атомных электростанций, автономных энергетических установок, судоремонтных предприятий, включая их управление и регулирование.

## 1. СТРУКТУРА, СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛА И ОЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К САМОСТОЯТЕЛЬНОЙ РАБОТЕ СТУДЕНТОВ (СРС)

### 1.1. Структура разделов «Судовые электрические машины постоянного тока» и «Судовые трансформаторы» дисциплины «Судовые электрические машины»

Таблица 1.1 – Структура разделов «Судовые электрические машины постоянного тока», «Судовые трансформаторы учебной дисциплины «Судовые электрические машины»

| Наименование темы                                  | Семестр | Общее количество часов | Контактная работа |                          |                         |                            | Формы текущего контроля |
|----------------------------------------------------|---------|------------------------|-------------------|--------------------------|-------------------------|----------------------------|-------------------------|
|                                                    |         |                        | Лекции, ч.        | Практические занятия, ч. | Лабораторные работы, ч. | Самостоятельная работа, ч. |                         |
| Раздел 1 Судовые машины постоянного тока           |         |                        |                   |                          |                         |                            |                         |
| Тема 1. Общие вопросы судовых электрических машин. | 4       | 4                      | 2                 |                          |                         | 2                          |                         |
| Тема 2. Судовые машины постоянного тока.           | 4       | 52                     | 12                | 8                        | 8                       | 24                         | тестирование            |
| Промежуточная аттестация по Дисциплине - зачет     | 4       |                        |                   |                          |                         |                            |                         |
| Итого по разделу                                   |         | 56                     | 14                | 8                        | 8                       | 26                         |                         |
| Раздел 2 Судовые трансформаторы                    |         |                        |                   |                          |                         |                            |                         |
| Тема 3. Судовые трансформаторы.                    | 4       | 34                     | 8                 | 4                        | 6                       | 16                         | тестирование            |
| Итого по разделу                                   |         | 34                     | 8                 | 4                        | 6                       | 16                         |                         |
| Всего по разделам                                  |         | 90                     | 22                | 12                       | 14                      | 42                         |                         |

### 1.2. Содержание самостоятельной работы и перечень учебно-методического обеспечения для обучающихся дисциплине

#### 1.2.1. Самостоятельная работа

Общими принципами при организации СРС являются: воспитание потребности в самообразовании; формирование интереса к избранной профессии; интенсификация процесса усвоения знаний; дифференцированный подход к приобретению соответствующих дисциплине компетенций; применение полученных знаний для анализа ситуации и выработки правильного решения; формирование профессиональных умений и навыков будущего специалиста;

Таблица 1.2.1 – Структура и содержание СРС

| Наименование работы,<br>ее вид                | Содержание/характеристика работы,<br>планируемые результаты                                                                                                  |
|-----------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Подготовка к лекциям                          | Проработка и повторение лекционного материала по конспектам и раздаточному материалу. Усвоение знаний и приобретение компетенций по разделу дисциплины.      |
| Подготовка к лабораторным занятиям            | Подготовка с использованием методических указаний и контрольных вопросов к лабораторным работам. Выработка умений и навыков работы с электрическими машинами |
| Подготовка к практическим занятиям            | Проработка задач-аналогов по задачику для дисциплины. Закрепление знаний теоретического материала по дисциплине практическим путем.                          |
| Подготовка к промежуточному контролю - зачету | Подготовка с использованием конспекта, учебников и учебных пособий по дисциплине. Проверка знаний и приобретенных в ходе освоения курса компетенций          |

### 1.2.3. Рефераты

Целью подготовки и защиты рефератов по отдельным аспектам и темам дисциплины является углубление знаний студентов в различных разделах электромеханики. Для студентов, которые убывают на плавпрактику и учатся по индивидуальному графику, предлагается подготовка **реферата** (или индивидуального задания - РГЗ). Выбор темы осуществляется из общего перечня, который включает вопросы конструктивных исполнений судовых электрических машин, режимов их работы, проблем эксплуатации, специальных электрических машин, трансформаторов и их применения в судовых и автономных электроэнергетических системах, а также по другим разделам, не включенным в рабочую программу дисциплины.

Реферат должен содержать принципиальные и электромагнитные схемы электромеханических преобразователей или трансформаторов, основные аналитические соотношения, эскизы и схемы узлов и элементов, графики и диаграммы, отображающие режимы их работы с необходимыми пояснениями содержательного характера.

Реферат выполняется на стандартных листах А4 формата с полями: левое — 25 мм, правое — 10 мм, верхнее — 20 мм, нижнее 25 мм. Титульный лист стандартный для СевГУ, нумерация листов сквозная, арабскими цифрами в правом углу без точки. Нумерация рисунков, таблиц и формул также сквозная. Ориентировочный объём реферата 15...25 страниц. Тема выбирается по указанию преподавателя.

Основные составные части реферата:

- титульный лист;
- содержание;
- введение;
- основные разделы или главы;
- заключение;
- библиографический список;
- приложения.

В качестве индивидуального задания студентам могут быть предложены расчеты узлов электрических машин. Защита реферата и индивидуального задания проводится студентами в часы, предусмотренные в расписании консультаций.

#### *Темы рефератов*

1. Современные высокоиспользуемые двигатели постоянного тока для судовых систем автоматики и управления движением.
2. Широкорегулируемые двигатели постоянного тока для систем судового электропривода.
3. Магнитные материалы для современного электромашиностроения.
4. Совершенствование конструкций различных узлов машин постоянного тока.

5. Магнитные материалы для современного электромашиностроения и трансформаторостроения.
6. Вентильные двигатели постоянного тока и их применение на судах.
7. Развитие судового трансформаторостроения.
8. Вентильно-индукторные двигатели для гребных электрических установок.
9. Особенности эксплуатации, связанные с качеством изоляции и нагревом электрических машин постоянного тока
10. Эксплуатация коллекторно-щеточного аппарата и подшипниковых узлов судовых электрических машин постоянного тока.
11. Основные нештатные режимы работы судовых машин постоянного тока и их последствия.
12. Основные нештатные режимы работы судовых трансформаторов и их последствия.
13. Обзор аварийности судового электромеханического и трансформаторного оборудования и основные меры по ее предотвращению в соответствии с требованиями ПДНВ

#### 1.2.4. Учебно-методическое обеспечение самостоятельной работы

Таблица 1.2.2 – Содержание методического обеспечения СРС

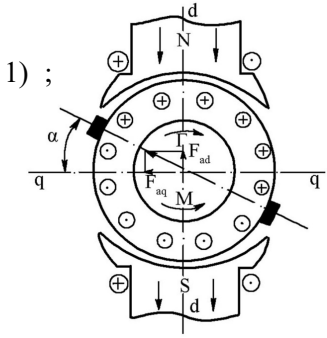
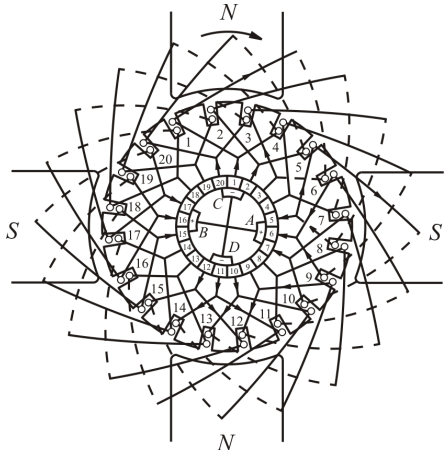
| Наименование работы, ее вид        | Перечень учебно-методического обеспечения СРС                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |
|------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Подготовка к лекциям               | 1. Беспалов В. Я. Электрические машины: учебн. пособие для студ. высш. учеб. заведений /В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 360 с                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| Подготовка к лабораторным занятиям | 2. Судовые электрические машины постоянного тока и трансформаторы: лабораторный практикум по дисциплине «Судовые электрические машины» для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» очной и заочной форм обучения/ Сост. В.Е. Высоцкий, И. Ю. Марков – Севастополь: изд-во СевГУ, 2023. –63 с.<br><a href="http://lib.sevsu.ru/xmlui/handle/123456789/11281">http://lib.sevsu.ru/xmlui/handle/123456789/11281</a>                                                                                          |
| Подготовка к практическим занятиям | 3. Судовые электрические машины: методические указания к практическим занятиям для студентов специальности 26.05.07 «Эксплуатация судового электрооборудования и средств автоматики» и по дисциплине «Электрические машины» для бакалавров направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» (профиль «Электрооборудование и автоматика судов») очной и заочной форм обучения. Сост. В.Е. Высоцкий – Севастополь: Изд-во СевГУ, 2020. – 55 с. <a href="http://lib.sevsu.ru/xmlui/handle/123456789/9164">http://lib.sevsu.ru/xmlui/handle/123456789/9164</a> |
| Подготовка к зачету                | 4. Копылов, И. П. Электрические машины в 2 т.: учебник для студентов электромехан. и электроэнерг. вузов / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. и доп., М.: Издательство Юрайт, 2019. — Т. 1, 267 с., — Т.2. —407 с. — (Высшее образование— Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <a href="https://biblio-online.ru/code/392372">https://biblio-online.ru/code/392372</a>                                                                                                                                                                                      |

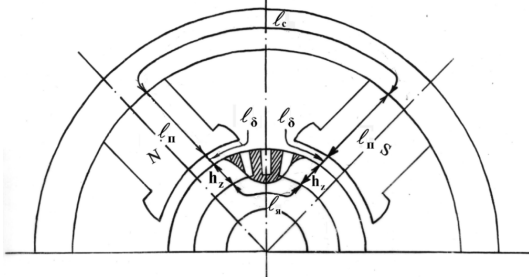
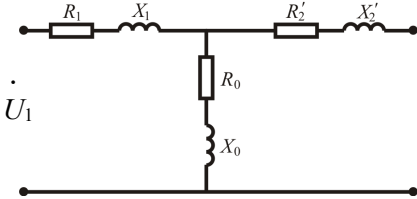
### 1.3. Подготовка студентов к контролю успеваемости по дисциплине

#### 1.3.1. Типовые вопросы по темам

Таблица 1.3 – Перечень типовых вопросов по темам

| Вид контроля и темы     | Перечень вопросов и задач                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Входной контроль</b> | <ol style="list-style-type: none"><li>1. Каковы основные интегральные величины и мгновенные значения переменных, применяемые в теории электрических цепей?</li><li>2. Что такое мгновенная мощность и энергия?</li><li>3. Какие единицы используются для измерения электрических величин?</li><li>4. Какие элементы входят в состав цепей постоянного и переменного тока?</li><li>5. Определите понятие «источник э.д.с».</li><li>6. Определите понятие «источник тока».</li><li>7. Что понимается под электрическими схемами замещения?</li><li>8. Какие элементы используются для описания топологии электрических схем?</li><li>9. Как формулируются основные законы электрических цепей: закон Ома, законы Кирхгофа, Джоуля, Ленца?</li><li>10. Как используются законы Ома и Кирхгофа для расчета электрических цепей на постоянном и переменном токе?</li><li>11. Какими уравнениями описываются линейные электрические цепи постоянного и переменного тока?</li><li>12. Поясните термины: «переходный», «установившийся» режим.</li><li>13. Как описываются гармонические колебания?</li><li>14. Как определяется мгновенное значение, текущая и начальная фаза, амплитуда, частота и угловая частота гармонического колебания, среднее и среднеквадратическое (действующее) значение периодической функции?</li><li>15. В чем сущность метода комплексов амплитуд и комплексов действующих значений переменных токов, напряжений и ЭДС?</li><li>16. Как формулируются законы Кирхгофа и Ома для цепей постоянного и переменного тока в вещественной и в комплексной форме?</li><li>17. Каковы виды схем соединений элементов электрической цепи постоянного и переменного тока и эквивалентные преобразования этих схем соединений (последовательное, параллельное, смешанное, «звезда», «треугольник»)?</li><li>18. Как строятся векторные диаграммы гармонических напряжений и токов электрических цепей, состоящих из одного, двух и трех элементов, соединенных последовательно или параллельно?</li><li>19. Как определяются средняя (активная), реактивная и полная (кажущаяся) мощности?</li><li>20. Как составляется баланс мощностей в цепях постоянного и переменного тока?</li><li>21. Как определяется и каково технико-экономическое значение коэффициента мощности?</li><li>22. Как осуществляется согласование источника энергии с нагрузкой по критериям максимума передаваемой средней мощности и максимума коэффициента полезного действия?</li><li>23. Как связаны между собой линейные и фазные токи, напряжения в различных схемах трехфазной цепи?</li><li>24. Как рассчитываются трехфазные цепи в симметричном режиме?</li><li>25. Как рассчитываются переходный процесс в электрической цепи классическим методом?</li><li>26. Какими магнитными свойствами обладают ферромагнитные материалы?</li><li>27. Как формулируются основные законы магнитных цепей постоянного и переменного тока?</li><li>28. Какова аналогия величин и законов для электрических и магнитных цепей?</li></ol> |

|                                   |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              |
|-----------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                   | <p>29. Какие методы используются для расчета магнитных цепей постоянного и переменного тока?</p> <p>30. Как определяются нелинейные характеристики и параметры катушки с сердечником из ферромагнитного материала.</p> <p>31. От каких факторов зависят потери мощности в сердечниках из ферромагнитного материала?</p> <p>32. Как формируется уравнение, строится векторная диаграмма и составляется эквивалентная схема катушек индуктивности с ферромагнитными сердечниками?</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| Наименование вида контроля и темы | Пример тестового задания                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| Текущий тестовый контроль         | <p>1. Укажите, каков характер действия магнитного поля реакции якоря в машине постоянного тока при сдвиге щеток с геометрической нейтрали:</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 2;"> <p>1) ;</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) продольный размагничивающий;</li> <li>2) поперечный размагничивающий и искажающий;</li> <li>3) продольный намагничивающий, поперечный искажающий и намагничивающий;</li> <li>4) поперечный намагничивающий и искажающий;</li> <li>5) продольный размагничивающий, поперечный искажающий и размагничивающий.</li> </ol> </div> </div> <p>2. На радиальной развертке показана обмотка якоря:</p> <div style="display: flex; align-items: center;"> <div style="flex: 1;">  </div> <div style="flex: 2;"> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) простая петлевая;</li> <li>2) сложная петлевая;</li> <li>3) простая волновая;</li> <li>4) сложная волновая;</li> <li>5) лягушечья.</li> </ol> </div> </div> <p>3. Данное выражение характеризует: <math display="block">i = i_a \left( 1 - 2 \frac{t}{T_k} \right) t</math> для машины постоянного тока</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1) ток линейной коммутации;</li> <li>2) ток криволинейной коммутации;</li> <li>3) ток коммутирующей секции;</li> <li>4) ток якорной цепи;</li> <li>5) ток параллельной ветви обмотки якоря.</li> </ol> |

|                                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|                                                        | <p>4. Для каких участков магнитной цепи машины постоянного тока справедлив выражение <math>F' = F_{\Pi} + F_c</math>:</p>  <p>1) для воздушных зазоров;<br/>2) для полюсов;<br/>3) для зубцово-пазовых зон;<br/>4) для участков якоря;<br/>5) для участков статора.</p> <p>5. Данная схема замещения отражает следующий режим работы трансформатора:</p>  <p>2) холостой ход;<br/>3) работу под нагрузкой;<br/>4) аварийное короткое замыкание;<br/>5) испытательное короткое замыкание;<br/>6) любой из указанных режимов.</p> |
| <p><b>Рубежный контроль, тема</b></p>                  | <p>Перечень вопросов и задач для подготовки к экзамену</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| <p><i>Раздел I Судовые машины постоянного тока</i></p> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |
| <p>T1</p>                                              | <p>1. Принцип действия и устройство машины постоянного тока<br/>2. Конструкция обмоток якоря машины постоянного тока<br/>3. Простая петлевая обмотка<br/>4. Сложная петлевая обмотка<br/>5. Простая волновая обмотка<br/>6. Сложная волновая обмотка</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |
| <p>T2</p>                                              | <p>7. ЭДС обмотки якоря и вращающий момент машины постоянного тока<br/>8. Магнитная цепь машины постоянного тока:<br/>9. Расчета м.д.с. участков машины постоянного тока<br/>10. Анализ реакции якоря машины постоянного тока<br/>11. Продольная и поперечная м.д.с. реакции якоря<br/>12. Влияние сдвига щеток на действие реакции якоря</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
| <p>T3</p>                                              | <p>13. Физическая сущность процессов коммутации в машине постоянного тока<br/>14. Уравнения и токо-временные диаграммы коммутации<br/>15. Ускоренная и замедленная коммутация<br/>16. Средства улучшения коммутации<br/>17. Шкала искрения и классы коммутации<br/>18. Причины искрения на коллекторе</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                         |
| <p>T4</p>                                              | <p>19. Классификация генераторов постоянного тока (ГПТ)<br/>20. Потери мощности и КПД машины постоянного тока<br/>21. Характеристики ГПТ с независимым возбуждением<br/>22. Условия самовозбуждения ГПТ<br/>23. Характеристики генераторов с самовозбуждением</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                 |
| <p>T5</p>                                              | <p>24. Особенности параллельной работы ГПТ<br/>25. Условия включения на параллельную работу генераторов параллельного возбуждения.<br/>26. Перевод и распределение нагрузки<br/>27. Особенности параллельной работы генераторов смешанного возбуждения</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |

|                                        |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| T6                                     | 28. Общие сведения о ДПТ<br>29. Принцип обратимости электрических машин<br>30. Уравнение электрического равновесия ДПТ<br>31. Рабочие характеристики двигателей параллельного и смешанного возбуждения<br>32. Рабочие характеристики ДПТ последовательного возбуждения                                                                                      |
| T7                                     | 33. Пуск двигателей постоянного тока<br>34. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока параллельного и смешанного возбуждения<br>35. Регулирование частоты вращения двигателей постоянного тока последовательного возбуждения                                                                                                               |
| <i>Раздел 2 Судовые трансформаторы</i> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| T8                                     | 1. Классификация и устройство трансформаторов<br>2. Принцип действия трансформатора<br>3. Простейший трансформатор<br>4. Уравнение электрического равновесия и векторная диаграмма при работе трансформатора в режиме холостого хода<br>5. Уравнения электрического равновесия и векторная диаграмма при работе трансформатора в режиме короткого замыкания |
| T9                                     | 6. Физический смысл и условия приведения трансформатора<br>7. Переменные и параметры приведенного трансформатора<br>8. Уравнения электрического равновесия трансформатора при работе под нагрузкой<br>9. Векторная диаграмма рабочего режима трансформатора<br>10. Схемы замещения приведенного трансформатора                                              |
| T10                                    | 11. Влияние нагрузки на величину вторичного напряжения трансформатора<br>12. Внешняя характеристика трансформатора<br>13. Потери трансформатора при работе под нагрузкой<br>14. КПД трансформатора<br>15. Определение параметров трансформатора из опытов холостого хода и короткого замыкания.                                                             |
| T11                                    | 1. Конструкция и принцип действия автотрансформатора<br>2. Коэффициент выгодности<br>3. Измерительный трансформатор тока<br>4. Измерительный трансформатор напряжения<br>5. Сварочный трансформатор<br>6. Включение трансформатора в сеть при холостом ходе<br>7. Эксплуатационное короткое замыкание. Сверхток.                                            |

### **1.3.2. Перечень контрольных вопросов к подготовке лабораторных работ**

#### **Лабораторная работа № 1**

##### **«Исследование генератора постоянного тока (ГПТ) независимого и параллельного возбуждения»**

1. Какие факторы влияют на напряжение ГПТ с независимым возбуждением при его работе под нагрузкой?
2. При каких условиях напряжение на зажимах обмотки якоря ГПТ с независимым возбуждением остается постоянным по величине?
3. При каких условиях происходит самовозбуждение ГПТ параллельного возбуждения?
4. Почему внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения более «мягкая», т.е. напряжение на зажимах генератора значительно уменьшается с нагрузкой по сравнению с генератором независимого возбуждения?
5. Почему ГПТ параллельного возбуждения устойчив к установившемуся короткому замыканию?
6. Как определить коэффициент насыщения магнитной системы ГПТ независимого возбуждения при напряжении, которое соответствует номинальному току генератора?
7. Объясните, что понимается под реакцией якоря и как она влияет на работу генератора?
8. Какие существуют способы уменьшения реакции якоря в зоне главных полюсов?
9. Какие характеристики генератора являются предельными и для чего они снимаются?
10. Сравните генераторы параллельного и независимого возбуждения.
11. Опишите области применения генераторов постоянного тока с независимым и параллельным возбуждением.

#### **Лабораторная работа № 2**

##### **«Исследование генератора постоянного тока смешанного возбуждения»**

1. На каком участке характеристики холостого хода генератора должна располагаться точка, соответствующая номинальной ЭДС и почему?
2. Какие обмотки располагаются на полюсах магнитной системы ГПТ со смешанным возбуждением?
3. Какая из обмоток генератора является основной, а какая дополнительной?
4. Что понимается под встречным и согласным включением обмоток возбуждения генератора?
5. Как объяснить наличие у ГПТ смешанного возбуждения семейства внешних характеристик?
6. Как объяснить наличие у ГПТ смешанного возбуждения семейства регулировочных характеристик?
7. Чем объясняется гистерезис (расхождение ветвей) регулировочной характеристики генератора?
8. Что произойдет если поменять полярность включения одной из обмоток возбуждения генератора?
9. Какие факторы влияют на вид внешней характеристики генератора?
10. Можно ли из генератора постоянного тока смешанного возбуждения сделать генератор постоянного тока последовательного возбуждения лишь отключением параллельной обмотки?
11. При каком включении обмоток ГПТ смешанного возбуждения обеспечивается постоянство напряжения на зажимах обмотки якоря при изменении тока якоря (нагрузки)?

#### **Лабораторная работа № 3**

##### **«Исследование двигателя постоянного тока (ДПТ) независимого возбуждения»**

1. Как осуществить пуск ДПТ с независимым возбуждением?
2. Как осуществить реверс т.е. изменить направление вращения ДПТ с независимым возбуждением?
3. Почему у ДПТ возрастает ток якоря при увеличении механической нагрузки на его валу?
4. Почему частота вращения ДПТ независимого возбуждения незначительно изменяется при увеличении механической нагрузки на его валу?
5. Какие факторы влияют на частоту вращения ДПТ независимого возбуждения при изменении момента нагрузки на валу?
6. Почему при уменьшении тока возбуждения частота вращения ДПТ возрастает?
7. Можно ли увеличивать ток обмотки возбуждения, чтобы уменьшить частоту вращения?
8. Почему при уменьшении напряжения на зажимах обмотки якоря частота вращения ДПТ уменьшается?

9. Можно ли увеличивать напряжение на зажимах обмотки якоря обмотки якоря, чтобы увеличить частоту вращения?
10. Как должен изменяться ток якоря при уменьшении тока возбуждения и постоянном моменте сопротивления на валу двигателя?
11. Как изменится вид механической характеристики двигателя, если ввести в цепь якоря добавочное сопротивление  $R_{дд}$ ?

#### **Лабораторная работа № 4**

##### **«Исследование двигателя постоянного тока смешанного возбуждения»**

1. Какая из обмоток возбуждения в ДПТ смешанного возбуждения считается основной?
2. Как изменяются механические характеристики двигателя параллельного возбуждения при согласном и встречном включении обмоток возбуждения?
3. Как изменяются механические характеристики двигателя последовательного возбуждения при согласном и встречном включении обмоток возбуждения?
4. Почему двигатели смешанного возбуждения должны иметь слабонасыщенную магнитную систему при номинальном режиме работы?
5. Применяется ли в электродвигателях смешанного возбуждения компенсационная обмотка?
6. При каком значении полезной мощности на валу КПД электродвигателя максимален?
7. Как сказывается на работе двигателя сдвиг щеток с геометрической нейтрали в направлении вращения якоря?
8. Как сказывается на работе двигателя сдвиг щеток с геометрической нейтрали против направления вращения якоря?
9. Как известно, при уменьшении тока возбуждения ниже номинального значения частота вращения электродвигателя возрастает. Можно ли уменьшать частоту вращения ДПТ увеличением тока возбуждения? Обоснуйте свой ответ для случая последовательной и параллельной обмоток.
10. Какими являются особенности пуска ДПТ смешанного возбуждения при согласном и встречном включении обмоток возбуждения?
11. Как у ДПТ смешанного возбуждения изменяется ток якоря при увеличении нагрузки на его валу?

### **ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ ПО ТРАНСФОРМАТОРАМ**

#### **Лабораторная работа № 5**

##### **«Исследование однофазного трансформатора»**

1. Почему ток холостого хода трансформатора очень мал и составляет несколько процентов от номинального тока?
2. Каков характер намагничивающего тока трансформатора?
3. Чем обусловлено потребление активной мощности при холостом ходе трансформатора?
4. В чем смысл приведения вторичной обмотки трансформатора к первичной?
5. Каковы условия приведения?
6. Как объяснить, что при опыте короткого замыкания принимается  $I_{1к} \approx I_{2к}$ ?
7. В чем принципиальное отличие схем замещения при холостом ходе и коротком замыкании?
8. Чем объяснить, что КПД трансформатора, как правило, определяют расчетным способом?
9. Как определяют коэффициент трансформации, коэффициент мощности и коэффициент загрузки трансформатора?
10. Какие потери имеют место в трансформаторе, от чего они зависят и как проявляются?
11. Каковы меры борьбы с вихревыми токами в трансформаторе?

#### **Лабораторная работа № 6**

##### **«Опытное определение групп соединения трехфазного двухобмоточного трансформатора»**

1. Какие существуют схемы соединения обмоток трехфазных трансформаторов?
2. Какие группы соединений трехфазных трансформаторов являются стандартными?
3. Какой принцип положен в основу определения групп соединений обмоток трансформаторов?
4. Какие существуют методы опытного определения группы соединений обмоток трансформаторов?
5. В чем заключается сущность метода вольтметра?
6. Какие условия включения трехфазных трансформаторов на параллельную работу являются необходимыми, а какие достаточными?

7. Почему при неодинаковых коэффициентах трансформации нагрузка между параллельно работающими трансформаторами распределяется неравномерно?
8. Что произойдет при включении на параллельную работу трансформаторов с различными группами соединений?
9. Какое различие между напряжениями короткого замыкания допускается при параллельной работе трансформаторов?
10. В каких пределах при этом должно находиться отношение номинальных мощностей трансформаторов?

### **Лабораторная работа № 7**

#### **«Исследование трехфазного трансформатора»**

1. Как трактуется принцип электромагнитной индукции применительно к трансформатору?
2. Поясните устройство магнитной и обмоточной систем трехфазного трансформатора
3. Поясните принцип действия трехфазного трансформатора
4. Каковы особенности холостого хода трехфазного трансформатора при различных схемах соединения фазных обмоток?
5. Какова роль нулевого провода при несимметричной нагрузке?
6. К каким последствиям может привести наличие несимметричной нагрузки по фазам трехфазного трансформатора?
7. Каким образом передается мощность из первичной обмотки трансформатора во вторичную?
8. Каково соотношение между токами и напряжениями первичной и вторичной обмоток?
9. Каковы соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при соединении обмоток в «звезду и треугольник»?

## 1.4. Информационное обеспечение самостоятельной работы

### 1.4.1. Перечень основной и дополнительной литературы, необходимой для самостоятельной работы над разделом дисциплины

Таблица 1.4.1 – Основная и дополнительная литература

| Наименование учебника, учебного пособия                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        | Количество экз. в библиотеке                                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2                                                                                              |
| <b>Основная литература</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |                                                                                                |
| 1. Копылов, И. П. Электрические машины: учебник для студентов электромехан. и электроэнерг. вузов /И. П. Копылов. - М.: Высш. шк.:, 2004. – 360 с.                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 5                                                                                              |
| 2. Судовые электрические машины: учебно-методическое пособие /А.М. Олейников, В.Н. Мартынов. Под ред. проф. А.М. Олейникова. - Севастополь. Изд-во СевНТУ, 2009.- 316 с.                                                                                                                                                                                                                                                                       | 30                                                                                             |
| 3. Беспалов В. Я. Электрические машины: учебн. пособие для студ. высш. учеб. заведений /В. Я. Беспалов, Н. Ф. Котеленец. – М.: Издательский центр «Академия», 2006. – 360 с.                                                                                                                                                                                                                                                                   | 3                                                                                              |
| 4. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для студ. вузов/ А. И. Вольдек, В. В. Попов. - М. и др.: Питер, 2008. - 320 с.                                                                                                                                                                                                                                                            | 8                                                                                              |
| 6. Судовые электрические машины и их эксплуатация: учебное пособие /А.М. Олейников, В.Н. Мартынов. Под ред. проф. А.М. Олейникова. - Севастополь. Изд-во СевНТУ, 2013. - 372 с.                                                                                                                                                                                                                                                                | 30                                                                                             |
| 7. Копылов, И. П. Электрические машины в 2 т.: учебник для студентов электромехан. и электроэнерг. вузов / И. П. Копылов. – 2-е изд., испр. и доп., М.: Издательство Юрайт, 2019. — Т. 1, 267 с., — Т.2. —407 с. — (Высшее образование). — ISBN 978-5-534-03222-2 (т.1), ISBN 978-5-534-03224-6 (т.2) — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <a href="https://biblio-online.ru/code/392372">https://biblio-online.ru/code/392372</a> | Доступ для неограниченного числа авторизованных пользователей, по IP-адресам                   |
| <b>Дополнительная литература</b>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                               |                                                                                                |
| 1                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                              | 2                                                                                              |
| 4. Проектирование электрических машин: Учеб. для втузов /А Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И. С. Свириденко; под редакцией Гольдберга А. Д. – М.: Высшая школа, 2001. – 430 с.                                                                                                                                                                                                                                                                       | 8                                                                                              |
| 2. Жуловян, В. В. Электрические машины: электромеханическое преобразование энергии: учеб. пособие для вузов / В.В. Жуловян. — М.: Издательство Юрайт, 2019. — 425 с. — (Университеты России). — ISBN 978-5-534-04292-4. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <a href="https://biblio-online.ru/bcode/437944">https://biblio-online.ru/bcode/437944</a>                                                                             | Доступ для неограниченного числа авторизованных пользователей, регистрация по IP-адресам СевГУ |
| 3. Быстрицкий, Г. Ф. Электроснабжение. Силовые трансформаторы: учеб. пособие для вузов / Г.Ф. Быстрицкий, Б.И. Кудрин — 2-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2019. — 201 с. — (Университеты России). — ISBN 978-5-534-08404-7. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <a href="https://biblio-online.ru/bcode/434641">https://biblio-online.ru/bcode/434641</a>                                                          |                                                                                                |
| 2. Игнатович, В. М. Электрические машины и трансформаторы: учеб. пособие для вузов / В.М. Игнатович, Ш.С. Ройз. — 6-е изд., испр. и доп. — М.: Издательство Юрайт, 2019. — 181 с. — (Университеты России). — ISBN 978-5-534-00881-4. — Текст: электронный // ЭБС Юрайт [сайт]. — URL: <a href="https://biblio-online.ru/bcode/414597">https://biblio-online.ru/bcode/414597</a>                                                                |                                                                                                |

#### 1.4.2. Перечень ресурсов информационно-коммуникационной сети «Интернет», необходимых для освоения дисциплины

Таблица 1.4.2 – Описание информационных ресурсов необходимых для освоения раздела дисциплины

| №  | Адрес сайта и его описание                                                                                           | Перечень материалов, представленных на сайте                                                                                                                                                                 |
|----|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | 2                                                                                                                    | 3                                                                                                                                                                                                            |
| 1  | Библиотека Севастопольского государственного университета<br><a href="http://lib.sevsu.ru/">http://lib.sevsu.ru/</a> | Учебная, научная литература, периодические издания, издаваемые в СевГУ и других вузах, научных организациях, реферативные журналы, издаваемые ВИНТИ                                                          |
| 2  | Национальный цифровой ресурс Руконт: <a href="http://rucont.ru/">http://rucont.ru/</a>                               | Учебная, научная литература, а также периодические издания                                                                                                                                                   |
| 3  | ЭБС znanium.com ( <a href="http://www.znanium.com">www.znanium.com</a> - издательство ИНФРА-М)                       | Учебники и учебные пособия, диссертации и авторефераты, монографии, статьи, сборники научных трудов, энциклопедии, научную периодику, профильные журналы, справочники, законодательно-нормативные документы  |
| 4  | Электронная библиотека «Наука и техника» - <a href="http://n-t.ru/">http://n-t.ru/</a>                               | Учебная, научная литература, а также периодические издания и сборники научных трудов                                                                                                                         |
| 5  | Электронно-библиотечная система IQ - <a href="http://www.iqlib.ru/">http://www.iqlib.ru/</a>                         | Учебники и учебные пособия, монографии, статьи, сборники научных трудов, энциклопедии, научную периодику, профильные журналы, справочники                                                                    |
| 6  | ЭБС book.ru ( <a href="http://www.book.ru/">http://www.book.ru/</a> - Издательство КНОРУС)                           | Современная учебная и научная литература издательства Кнорус, соответствующая федеральным государственным образовательным стандартам                                                                         |
| 7  | ЭБС издательства «Лань»( <a href="http://e.lanbook.com">http://e.lanbook.com</a>                                     | Электронные версии книг издательства Лань по инженерным наукам и др.                                                                                                                                         |
| 8  | Книгофонд ( <a href="http://www.knigafund.ru/">http://www.knigafund.ru/</a> )                                        | Единая база учебно-методических комплексов, практикумов, а также изданий, рецензируемых ВАК Минобрнауки РФ                                                                                                   |
| 9  | ЭБС «ЮРАЙТ» ( <a href="http://www.biblio-online.ru">www.biblio-online.ru</a> ):                                      | Представлена информация по широкому спектру технических дисциплин: труды, монографии, учебно-методические материалы для студентов; подборка энциклопедий, справочников по разнообразным направлениям техники |
| 10 | Техническая литература - <a href="http://tehlit.ru/">http://tehlit.ru/</a>                                           | Единая база технических дисциплин: труды, монографии, учебно-методические материалы; энциклопедии, справочники по техническим наукам                                                                         |

## 1.5. Методические указания к самостоятельной работе

Машины постоянного тока и трансформаторы являются одними из самых сложных для изучения с точки зрения происходящих в них электромеханических и электромагнитных процессов. В связи с этим при овладении учебным материалом необходимо ясное понимание, четкое представление и твердое усвоение принципов действия, конструкций, эксплуатационных характеристик и особенностей режимов работы таких электромеханических и электромагнитных преобразователей

Целью данного пособия является предоставление каждому студенту-электромеханику возможности закрепить и дополнить знания в области судовых электрических машин постоянного тока и трансформаторов путем самостоятельной тщательной проработки и решения задач практических занятий, выполнения расчетов по данным экспериментальных исследований при проведении лабораторных работ по следующим разделам дисциплины «Судовые машины постоянного тока», «Судовые трансформаторы».

Учебная дисциплина «Судовые электрические машины» является одной из общепрофессиональных основополагающих дисциплин в общей системе подготовки инженеров-электромехаников по специальности «Эксплуатация судового электрооборудования и систем автоматики». В результате овладения дисциплиной студенты получают теоретические и практические знания процессов электромеханического и электромагнитного преобразования энергии. Предметом изучения являются электрические машины и трансформаторы. Изучение электрической машины дает полное и четкое представление о ней как об объекте автоматизации, ее рабочих характеристиках, регулировочных свойствах, энергетическом балансе.

При изложении материала автор придерживался принципа *qui vidit – bis legit* («кто видит, тот дважды читает»). У большинства студентов зрительная память развита лучше словесной. Рисунок или простой эскиз говорит гораздо больше, чем многие страницы объяснений, поэтому многие положения, приводимые в тексте, сопровождаются иллюстрациями.

Особенностью содержания пособия является и то, что уже в начале работы над пособием студент знает, что должно быть на «выходе», и четко представляет, что он должен знать и уметь. При этом объектно-предметное содержание материала в пособии предполагает, прежде всего, раскрытие «технологии» овладения материалом. Это отражается в подборе, расположении и разборе решений определённых, наиболее распространённых типов задач, приёмов конспектирования литературы и т.п.

Работа с таким пособием осуществляется студентом индивидуально на аудиторном занятии или во внеурочное время. Студенты читают текст пособия, и анализируют описанные решения, пытаются осознать сущность теоретических понятий, понять логику расчетных моделей и алгоритмов. Вся эта работа ведётся в индивидуальном для каждого студента темпе и позволяет ему наиболее осмысленно и эффективно выполнять необходимые расчёты в ходе овладения материалом, самостоятельно решать варианты типовых задач, консультироваться, если необходимо, с преподавателем. Если работа над пособием ведется в аудитории, то преподаватель в личном контакте направляет работу тех студентов, которые испытывают те или иные затруднения.

Работа студента с пособием не регламентируется обязательной проработкой того или иного количества страниц за время одного занятия. На каждом последующем занятии студент продолжает изучение материала с того, чем закончилась его работа на предыдущем занятии. Так осуществляется неразрывная связь последующего с предыдущим, повышается осмысленность всей работы, приобретается опыт углубленной систематической работы с печатным текстом или его электронной версией. Темп работы с текстом пособия определяется самим студентом. Однако в течение семестра студентом должно быть проработано два раздела дисциплины. Это требует от каждого студента планирования темпа своей работы, чтобы успеть выполнить всю учебную программу к положенному сроку. Кроме того, от него требуется определённая самоорганизация, определяющая интенсивность работы студента с текстом пособия.

При этом каждый студент учится (а преподаватель на всех видах занятий стремится оказать ему в этом соответствующую помощь) правильно организовывать свою самостоятельную работу над учебным материалом, планировать её этапы и распределять между ними рабочее время. Это необходимо для того, чтобы в заданный срок и с надлежащим качеством овладеть учебным материалом – решить задачи на практических занятиях, выполнить экспериментальные исследования и расчеты в ходе лабораторных работ.

Преподаватель может предложить студенту найти, в какой главе и параграфе учебника содержится материал «по вопросу о ...», выделить ключевые моменты приведённого содержания (о чём говорится, что говорится), сравнить, установить сходства и отличия материала по этому вопросу в конкретном пособии и учебнике или выполнить решение данной задачи по образцу решения одной из задач (найти какой) настоящего пособия и т.п. Выполнение заданий на сравнение материала по той или иной теме в различных учебниках позволит преподавателю определить подходящий для конкретного студента стиль обучения.

Задание, в ходе проведения практического занятия, может включать в себя и выполненное студентом самостоятельно составление тезауруса по изученной предметной области или теме. Преподаватель оценивает, в этом случае, самостоятельную работу студента, используя свои знания как знания эксперта.

Вопросы для самоконтроля сформированы таким образом, что своей постановкой требуют выполнения действий, которые должны быть направлены на приобретение соответствующих компетенций. На уровне самостоятельной проработки учебных материалов они содействуют выработке способностей к анализу и оценке эксплуатационных характеристик и параметров машин постоянного тока и трансформаторов. Эти вопросы ориентированы на практическую профессиональную применимость усвоенных знаний с возможностью дальнейшей интеграции полученного образования и производственных потребностей как со стороны объекта эксплуатации, так и командования судна.

В разделах пособия приводятся задачи или их совокупность, которые студентам требуется решить во время практических занятий или консультаций во внеаудиторное время для закрепления приобретённых знаний и умений, а также контрольные вопросы при подготовке к выполнению лабораторных работ.

### **1.5.1. Самостоятельное овладение учебным материалом как способ организации учебной деятельности студентов**

Самостоятельная работа является неотъемлемой частью учебного процесса. Именно во время самостоятельной работы приходит осмысление материала курса, полное сознательное его освоение.

Самостоятельная работа проводится в двух основных формах:

- организованная самостоятельная работа (ОргСРС);
- внеаудиторная самостоятельная работа (ВСРС).

ОргСРС осуществляется в аудитории, на практических занятиях, предусмотренных расписанием, а также на консультациях по дисциплине, регулярно проводимых преподавателем в течение семестра.

ВСРС ведется студентом самостоятельно, с использованием методических указаний и рекомендаций, разработанных по дисциплине.

Самостоятельную работу по указанным ранее разделам дисциплины можно разделить на следующие виды:

- изучение лекционного материала;
- выполнение типовых расчетно-графических заданий;
- подготовка к практическим и лабораторным занятиям.

Изучение лекционного материала заключается, прежде всего, во внимательном прочтении конспекта лекции и раздаточного материала. Безусловно, записать все, что излагает лектор невозможно, но нужно обязательно схватить, зафиксировать основное направление изложения, главные ориентиры лекции, ее основные идеи. Этому помогает раздаточный материал, которым лектор снабжает каждого студента. Он представляет, по существу, квинтэссенцию, «выжимку» материала лекции. При ведении конспекта на одной странице разворота конспекта следует зафиксировать раздаточный материал, а на другой – вести записи, давать комментарии, делать заметки, которые представляют собой свое, индивидуальное видение того или иного аспекта содержания лекции. Необходимо выработать и применять систему сокращений для наиболее часто встречающихся слов и словосочетаний. Следует четко выделять заголовки тем, наименование лекции ее подразделов и пунктов.

Во время последующего обращения к конспекту необходимо четко уяснить основную идею материала, по возможности повторить все выкладки, разобрать все приведенные на лекции примеры, усвоить основные соотношения и формулировки. При чтении конспекта целесообразно выяснять и записать вопросы, оставшиеся непонятными с тем, чтобы задать их преподавателю на следующей лекции или на консультации.

После работы с конспектом изучаемый материал необходимо проработать по учебнику. Обращаясь к учебнику, следует ограничиться лишь вопросами, разбираемыми на лекции, которые выносятся для самостоятельного изучения. Лучше пользоваться одним-двумя учебниками из рекомендованных лектором. Следует иметь в виду, что учебник и конспект – это не просто литература для чтения. Под «чтением» понимается проработка материала. При наличии компьютера можно формировать свои файлы по изучаемым материалам лекций. Это позволяет тщательно обдумывать то, что написано, доходить до сути рассматриваемых физических явлений или процессов. Критерием усвоения лекции является связный, краткий пересказ ее материала.

Выполнение расчетно-графических заданий производится обычно в соответствии с учебными пособиями и методическими указаниями, разработанными на кафедре. Необходимо подчеркнуть, что электромеханика – это практическое искусство, которое основано на ряде основных законов и включает

в себя большое количество правил, методик и приемов, которые твердо усваиваются только при постоянном конкретном применении. Особое внимание нужно обратить на своевременное выполнение этапов заданий в соответствии с календарным планом. Каждый этап контролируется по черновикам расчетов, после завершения всего задания они оформляются в виде записей в тетради по практическим занятиям или отчета по лабораторной работе.

Подготовка к практическим и лабораторным занятиям производится только после изучения соответствующего материала по конспекту и учебнику. Умение решать задачи и проводить экспериментальные исследования является одним из основных показателей при получении высшего профессионального образования. Электромеханика может трактоваться и как прикладное мастерство, а не абстрактная дисциплина. Примеры и специально подобранные учебные задачи, основанные на реальных применениях позволяют приобрести соответствующую компетентность, помогают использовать знания, полученные по дисциплине на практике.

Подготовка к практическим занятиям начинается с детального разбора конкретных примеров, приведенных на лекции и в учебнике. Далее по рекомендованному учебно-методическому пособию нужно рассмотреть основные типы задач по изучаемой теме и приемы их решения.

Подготовка к лабораторным занятиям производится обычно по методическим указаниям, имеющимся на кафедре. В этих указаниях точно обозначен необходимый объем теоретической и экспериментальной работы. Подготовка к лабораторной работе, в том числе по контрольным вопросам, является совершенно необходимой, без нее выполнить экспериментальные исследования невозможно.

В целом, овладение знаниями осуществляется по дидактическим законам, суть которых сводится к следующему.

1. Всякий, кто желает развиваться и овладевать знаниями, должен достигать этого своим собственным трудом, собственным напряжением воли, собственной настойчивостью, целеустремленностью, вниманием и добросовестностью. Извне можно получить только информацию и побуждение.

2. Для успешной познавательной деятельности необходимо осознание и принятие цели деятельности, четкое представление о том результате, который желательно получить, а также о тех методах и средствах, использование которых необходимо для достижения поставленной цели.

В соответствии с этим, процесс изучения учебного материала естественно разделяется на следующие этапы:

- 1) ознакомление с целями изучения;
- 2) изучение основ теории и методов решения типовых задач;
- 3) использование типовых способов и методов для решения задач профессиональной деятельности.

Наиболее важным этапом познания является второй – этап критического осмысления основных теоретических построений, уяснения наиболее рациональных и эффективных приёмов и методов применения теоретических знаний к решению типовых задач. При этом обучающийся постигает логику и методологию той деятельности, которая должна составить основу его профессиональной квалификации.

Построить собственный «инструмент» мышления можно только в результате самостоятельной, осознанной, активной и целенаправленной работы над текстами, отражающими цели, структуру и содержание изучаемого материала. Именно такие тексты и объединены в данном пособии по машинам постоянного тока, работу с которым автор рекомендует строить по методике, изложенной ниже.

### **1.5.2. Методические рекомендации по СРС**

При работе с данным пособием нужно следовать всем указаниям, изложенным в тексте, и стремиться к усвоению принятой в литературе по электрическим машинам постоянного тока символики и терминологии. Обучающиеся должны предварительно овладеть основами теории, методами составления и анализа схем и моделей. Следует изучить способы записи соотношений и методику расчетов. Во время обучения студенту необходимо анализировать соотношения и зависимости между различными электрическими и неэлектрическими величинами и стараться дать оценку результатам.

Необходимо изучить и усвоить методы определения характеристик и режимов работы типовых электромеханических преобразователей постоянного тока и трансформаторов, а также познакомиться и научиться пользоваться справочниками, каталогами - паспортами, инструкциями, техническими описаниями этих изделий.

При работе с этим пособием потребуются внимание и вдумчивое штудирование или выделение в тексте пособия смысловых узлов. Выделять можно любым способом, но лучше обводить рамкой. В работе подробно, шаг за шагом разбираются различные приемы, например ведения конспекта с использованием раздаточного материала или составление тезауруса по теме. Это вызвано заботой о фундаментальном

формировании умений. Студентам предлагается самостоятельно поработать над каждым из приемов из числа представленных.

При работе с пособием рекомендуется вести рабочую тетрадь, непременно используя чертёжно-графический инструмент и вычислительные средства (смартфоны или компьютеры).

Записи в рабочую тетрадь следует делать только после соответствующих указаний в тексте пособия и после того, как соответствующий материал осмыслен и усвоен.

**Простое ознакомление с раздаточным материалом лекций** создаёт только видимость работы, но не способствует эффективному овладению учебным материалом.

Первая часть работы по изучению каждого раздела пособия должна быть полностью посвящена знакомству с целями изучения и овладению основами теории по учебнику.

Основным этапом работы над пособием является применение основ теории к расчетам, проводимых в ходе выполнения лабораторных работ и решению типовых задач. При работе над этой частью пособия рекомендуется следующее:

- 1) уяснить и записать в рабочую тетрадь цели и задачи по каждой теме;
- 2) изучить общий подход к решению поставленной задачи по рекомендуемой литературе и записать алгоритм её решения;
- 3) изучить пример решения варианта этой задачи (п. 2 и 3 можно поменять местами);
- 4) решить самостоятельно ещё один вариант задачи;
- 5) продолжить изучение.

Материалы для самостоятельной работы имеют то преимущество, что можно работать с ними в удобном темпе не только на аудиторных занятиях, но и в любое время, и в любом месте по своему выбору. Эти материалы рассчитаны на активную работу, поскольку они предназначены не только для прочтения. Следующие ниже рекомендации помогут студентам использовать материалы для самостоятельной работы с максимальной эффективностью.

1. Прежде, чем приниматься за изучение материалов для самостоятельной работы, нужно определить, предусматривают ли они наличие каких-либо определённых навыков. Информация об этом обычно содержится в целях предыдущих тем.

2. Следует обратить особое внимание и постоянно возвращаться к целям обучения, следя за продвижением в их достижении. Цели обычно излагаются фразами вида «завершив изучение этой темы, вы должны уметь...».

3. Особенно полезны для самостоятельной работы разделы активного типа, содержащие задания, которые нужно выполнять по мере их проработки. Эти разделы называют «Вопросами для самопроверки». Как бы вам ни хотелось их пропустить и читать дальше, не делайте этого! Даже если вы думаете, что знаете ответы, запишите их и сравните написанное с приведёнными в рекомендуемой литературе. Если ответ неверен, то определите, в чём была допущена ошибка.

4. Встретив непонятное для вас место, не бейтесь над ним долго. Загляните немного дальше: следующий раздел может оказаться вполне понятным. Заметьте себе, что конкретно вы не поняли в предыдущем разделе. После разъяснений преподавателя вопрос может показаться вам проще.

5. Получив раздаточные материалы для самостоятельной работы в своё распоряжение, пользуйтесь ими как своими собственными, т.е. записывайте комментарии и делайте пометки по всему тексту (пишите также ответы на вопросы для самопроверки). Поскольку то, что вы сами добавили к материалам, обычно запоминается лучше, это хороший способ увеличить объём сведений, находящихся в памяти.

6. Постоянно возвращайтесь назад и припоминайте то, что уже пройдено. Чем чаще вы будете пропускать пройденный материал через свой интеллект, тем глубже вы его усвоите.

## 2. ЗАДАЧИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО РАЗДЕЛУ «СУДОВЫЕ МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА»: ЗАДАНИЯ, МЕТОДИКА, ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ

### 2.1. Методика и задания, таблицы исходных данных для выполнения задач практических занятий по разделу «Судовые машины постоянного тока»

**Задача 2.1.** *Рассчитать шаги, на основе таблицы соединений секционных сторон обмотки якоря построить плоскостную развертку замкнутой равносекционной двухслойной обмотки машины постоянного тока.*

**Задача 2.2.** *Построить характеристику холостого хода и характеристический треугольник, соответствующий номинальному режиму генератора. Определить ток возбуждения и сопротивление реостата в цепи возбуждения генератора параллельного возбуждения при номинальной нагрузке.*

**Задача 2.3.** *Построить внешние характеристики генераторов с независимым и параллельным возбуждением. Определить для них номинальное изменение напряжения.*

**Задача 2.4.** *Для заданной электрической машины, работающей в режиме электродвигателя параллельного возбуждения, рассчитать и построить скоростную характеристику  $n = f(I)$ .*

### Методические указания

**К задаче 1.** Исходные данные для решения задачи находят в табл. 2.1 по варианту, заданному для студента. Теоретический материал, необходимый для решения задачи, изложен в учебной литературе [1, гл. 3 § 3-1; 3-3; 3-5]; [2, гл. 3 § 3-9; 3-11].

### Определение обмоточных данных

При определении типа обмотки следует иметь в виду, что в петлевой обмотке  $2a = 2p$ ,  $Z$  и  $K$  - четные; в волновой обмотке  $2a = 2$ , а  $Z$  и  $K$  - нечетные. Исходным данным соответствуют простые равносекционные обмотки.

Схема обмотки или, иначе говоря, плоскостная развертка, строится в шагах по элементарным пазам. Между тем, в исходных данных указано число реальных пазов якоря. Для перехода к расчету шагов по элементарным пазам следует учесть следующее:

число элементарных пазов всегда равно числу коллекторных пластин

$$Z_{эл} = K;$$

в одном реальном пазу содержится  $u$  элементарных пазов

$$u = \frac{Z_{эл}}{Z} = \frac{K}{Z};$$

если шаг по реальным пазам определяется соотношением

$$y_{1.2} = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon,$$

где  $\varepsilon$  – число долей паза, дополняющее шаг по реальным пазам до целого числа,

то шаг по элементарным пазам равносекционной обмотки будет

$$y_1 = y_{1.2} u.$$

Полный шаг, второй частичный шаг и шаг по коллектору определяется по соотношениям, приведенным в рекомендуемой литературе. Там же даны примеры построения таблиц соединения секционных сторон обмотки якоря.

**Примечание.** При выполнении учебной задачи 2.1 принято, что число коллекторных пластин равно числу реальных пазов, т.е. число элементарных пазов в реальном пазу  $u = 1$ , т.е. элементарные пазы совпадают с реальными.

**К задаче 2.2.** При решении задачи 2.2 исходные данные находят по табл. 2.2., 2.3.  
Теоретический материал к задаче изложен в  
[1, гл. 9, § 9-3; 9-4]; [2, гл.8, § 8-8, 8-9].

### Определение данных для расчета характеристик машин постоянного тока

Данные для расчетов задач 2.2, 2.3, 2.4 берут из таблиц 2.2 и 2.3. В таблице 2.2 приведены исходные номинальные данные машины при частоте вращения 1500 об/мин и напряжении в генераторном режиме 230 В. В табл. 3 представлены номинальные значения частоты вращения и напряжения машины в генераторном и двигательном режимах для заданного варианта.

Пересчет номинальных данных проводится в следующей последовательности:

по номеру варианта находят в табл. 2.2 вариант исходных номинальных данных; по номеру варианта определяют по табл. 2.3 заданные частоту вращения и напряжение.

Пересчет исходных данных проводится по соотношениям:

а) номинальная мощность

$$P_{H.} = P_{H.И.} \cdot \frac{n_{H.}}{1500}, \text{ кВт}$$

где  $P_{H.И.}$  - исходное значение мощности, равное значению, указанному в табл. 2.2;

$n$  - номинальная частота вращения (табл. 2.3);

б) ток возбуждения при холостом ходе

$$I_{B.O.} = I_{B.O.И.} \cdot \left( \frac{230}{U_{H.}} \right),$$

где  $I_{B.O.И.}$  - исходное значение тока возбуждения (табл. 2.2);

$U_{H.}$  - номинальное напряжение в режиме генератора (табл. 2.3);

в) реакция якоря при номинальном токе якоря в масштабе тока возбуждения

$$I_{B.A.} = I_{B.A.И.} \cdot \left( \frac{230}{U_{H.}} \right),$$

где  $I_{B.A.И.}$  - исходное значение реакции якоря (табл. 2.2);

г) сопротивление обмотки якоря

$$r_{я.} = r_{я.И.} \cdot \left( \frac{1500}{n_{H.}} \cdot \frac{U_{H.}}{230} \right)^2,$$

где  $r_{я.И.}$  - исходное значение сопротивления обмотки якоря (табл. 2.2);

д) сопротивление обмотки добавочных полюсов

$$r_{д.} = r_{д.И.} \cdot \left( \frac{U_{H.}}{230} \right)^2,$$

где  $r_{д.И.}$  - исходное значение сопротивления обмотки добавочных полюсов (табл. 2.2);

е) сопротивление обмотки возбуждения

$$r_{в.} = r_{в.И.} \cdot \left( \frac{U_{H.}}{230} \right)^2,$$

где  $r_{в.И.}$  - исходное значение сопротивления обмотки возбуждения (табл. 2.2).

**Пример.** Задание с вариантом 9 по таблице 2.2 и вариантом 6 по таблице 2.3 соответствует генератору со следующими данными: скорость вращения  $n_{H.} = 3000$  об/мин., напряжение  $U_{H.} = 115$  В;

$$P_{H.} = 22 \cdot \frac{3000}{1500} = 44 \text{ кВт};$$

$$I_{B.O.} = 1,7 \cdot \frac{230}{115} = 3,4 \text{ А};$$

$$I_{B.A} = 0,35 \cdot \frac{230}{115} = 0,7 \text{ А};$$

$$r_{я.} = 0,06 \left( \frac{1500 \cdot 115}{3000 \cdot 230} \right)^2 = 0,00375 \text{ Ом};$$

$$r_{д.} = 0,02 \left( \frac{1500 \cdot 115}{3000 \cdot 230} \right)^2 = 0,00125 \text{ Ом};$$

$$r_B = 65 \left( \frac{115}{230} \right)^2 = 16,25 \text{ Ом}.$$

После проведения расчетов результаты заносят в табл. А

**Номинальные данные машины постоянного тока** Таблица А

| $P_n$ ,<br>кВт | $n_n$ ,<br>об/мин | $U_n$ ,<br>В | $U_{н.д}$<br>В | $I_{в.о.}$<br>А | $I_{в.а.}$<br>А | $r_{я.}$<br>Ом | $r_{д.}$<br>Ом | $r_B$<br>Ом |
|----------------|-------------------|--------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|-------------|
|                |                   |              |                |                 |                 |                |                |             |

Для построения характеристики холостого хода следует использовать данные табл. Б.

**Базисная характеристика холостого хода в относительных единицах** Таблица Б

| $I_B^*$ | 0    | 0,5  | 1,0 | 1,5  | 2,0  | 2,5  | 3,0  | 3,5  |
|---------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| $E^*$   | 0,05 | 0,75 | 1,0 | 1,12 | 1,20 | 1,26 | 1,30 | 1,33 |

Характеристику холостого хода следует построить в абсолютных единицах. Пересчет данных осуществляют по формулам:

$$I_B = I_B^* \cdot I_{B.O.}; \quad E = E^* \cdot U_n.$$

Результаты вычислений следует занести в таблицу В.

**Характеристика холостого хода генератора.** Таблица В

| $I_B$ , А |  |  |  |  |  |  |  |  |
|-----------|--|--|--|--|--|--|--|--|
| $E$ , В   |  |  |  |  |  |  |  |  |

Номинальный ток якоря определяют по выражению:

$$I_{я.н.} = \frac{P_n}{U_n} \cdot 10^3, \text{ А}$$

Характеристику холостого хода, как и другие характеристики, в контрольной работе строят на миллиметровой бумаге в удобном для построения масштабе. Масштаб наносится по осям координат, начиная с нуля. На концах осей координат с нанесенным масштабом стрелки не ставят, а указывают наименование и единицу измерения откладываемого параметра. Точки характеристики наносят строго по расчету, а сама характеристика проводится плавно по точкам.

Катет  $B_H$ ,  $C_H$ , характеристического треугольника, соответствующий падению напряжения в цепи якоря и щеточном контакте, находят по формуле:

$$E_H - U_H = I_{я.н.} (r_{я} + r_d) + \Delta U_{щ}, \quad (2.1)$$

где  $\Delta U_{щ}$  - падение напряжения в щеточном контакте

(следует принять  $\Delta U_{щ} = 2 \text{ В}$ ).

Катет  $A_H B_H$  характеристического треугольника, соответствующий току  $I_{В.н.}$  определен ранее при расчете номинальных данных генератора (табл. А). Его нужно отложить в масштабе, принятом для тока возбуждения.

Для нахождения тока возбуждения  $I_{В.н.}$  при номинальной нагрузке следует вычислить  $E_H$  по уравнению (2.1), отложить ее на характеристике холостого хода (точка А) и пристроить характеристический треугольник (рис. 2.1).

По заданному напряжению  $V_H$  генератора и найденному номинальному току возбуждения  $I_{В.н.}$  определяют сопротивление цепи возбуждения  $R_{ц.в.}$ , а затем и сопротивление реостата в цепи  $R_{р.в.}$ .  $R_{р.в.} = R_{ц.в.} - r_B$ .

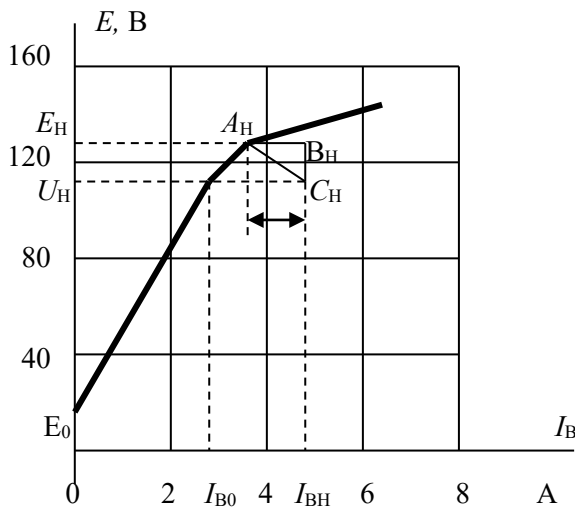


Рис. 2.1 – Построение характеристического треугольника

### **К задаче 3.**

Для построения внешних характеристик следует использовать характеристику холостого хода и характеристический треугольник, рассчитанные в задаче 2.2. Порядок построения изложен в литературе [1, § 9-3, 9-4] или в [2, § 8-8, 8-9].

Построение внешних характеристик - задача графоаналитическая, токи якоря  $I_X$  для всех выбранных точек должны быть рассчитаны аналитически по соотношению

$$I_X = I_{я.н.} \frac{A_X C_X}{A_H C_H},$$

где  $I_{я.н.}$  - номинальное значение тока якоря;

$A_H C_H$ ;  $A_X C_X$  - гипотенузы характеристического треугольника соответственно в номинальном и искомом режимах, мм.

Внешние характеристики должны быть построены полностью от режима холостого хода и до режима короткого замыкания, и при этом должно быть рассчитано не менее 4-6 точек характеристики (включая режимы холостого хода, номинальный, короткого замыкания и критический - для генератора параллельного возбуждения).

Внешнюю характеристику для случая независимого возбуждения следует построить при неизменном токе возбуждения  $I_{В.н.}$ , а для параллельного - и неизменном сопротивлении цепи возбуждения  $R_{ц.в.}$ , определенном в задаче 2.

При определении критической точки внешней характеристики генератора параллельного возбуждения необходимо провести касательную к характеристике холостого хода параллельно линии

$$I_B R_{цв} = f(I_B).$$

Точка  $A_{к.р.}$  характеристического треугольника для этого режима должна находиться в точке касания.

При определении тока короткого замыкания генератора параллельного возбуждения следует исходить из уравнения

$$U = E - I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + r_{\text{д}}) - \Delta U_{\text{ш}};$$

поскольку при коротком замыкании  $U = 0$ , а  $E = E_0$ , ток короткого замыкания определяют по выражению

$$I_{\text{к.з.}} = \frac{E_0 - \Delta U_{\text{ш}}}{r_{\text{я}} + r_{\text{д}}}.$$

#### **Примечание**

Приведенное соотношение не учитывает реакцию якоря, поэтому в некоторых вариантах  $I_{\text{кз}}$  получается неоправданно большой. При получении  $I_{\text{кз}} > I_{\text{ян}}$  следует определить ток короткого замыкания графически. Для этого продолжают полученную ранее часть внешней характеристики до пересечения с осью тока якоря.

Методика определения номинального изменения напряжения указана в учебной литературе [1, § 9-3 ] или [2, § 8-8, разд. В].

**К задаче 4.** Скоростная характеристика  $n = f(I)$  машины постоянного тока, работающей в режиме электродвигателя с параллельным возбуждением, рассматривается в литературе [1, § 10-4 ] и [2, §10-11]. Аналитически она выражается уравнением

$$n = \frac{U_{\text{н.д.}} - I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + r_{\text{д}}) - \Delta U_{\text{ш}}}{C_e \Phi}.$$

С помощью этого уравнения рассчитать характеристику трудно, если не известна величина потока  $\Phi$  двигателя в воздушном зазоре. Этот поток образуют МДС возбуждения  $F_{\text{в}}$  и МДС реакции якоря  $F_{\text{а}}$ .

Для определения электромеханической характеристики применяют косвенный метод, в котором используют характеристику холостого хода машины при номинальной частоте вращения (построена в задаче 2).

В качестве исходных данных берутся номинальные данные машины (табл. А). Номинальный ток якоря определен в задаче 2.

Порядок расчета скоростной характеристики следующий.

1. Задаемся значениями тока якоря:

$$I = 0; 0,5; I; 1,5; 2 I_{\text{ян}}$$

2. Для каждого значения тока якоря определяем ЭДС при неизвестном значении частоты вращения  $n$ , пользуясь уравнением

$$E = U_{\text{н.д.}} - I_{\text{я}}(r_{\text{я}} + r_{\text{д}}) - \Delta U_{\text{ш}},$$

Примечание. При  $I_{\text{я}} = 0$  падение напряжения под щетками принять равным нулю, при остальных токах - равным 2В.

3. Определяем ток возбуждения двигателя

$$I_{\text{в.д.}} = \frac{U_{\text{н.д.}}}{r_{\text{в.}}},$$

4. Для каждого значения тока якоря находим часть тока возбуждения двигателя, обеспечивающую создание рабочего потока  $\Phi$  в воздушном зазоре с учетом действия реакции якоря

$$I'_{\text{в}} = I_{\text{в.д.}} - I_{\text{в.а}} \frac{I_{\text{я}}}{I_{\text{я.н.}}},$$

Ток  $I_{\text{в.а}}$  принимается по табл. А.

5. Для каждого значения тока  $I'_{\text{в}}$  по характеристике холостого хода (рис. 2.1) определяют ЭДС  $E'$ , которая была бы при вращении машины с частотой вращения  $n$  (табл. А).

6. Для каждого значения тока якоря находят частоту вращения двигателя по соотношению

$$n = n_{\text{н}} \frac{E}{E'},$$

Оно получено из отношения выражений  $E = C_e n \Phi$  и

$E' = C_e n \Phi$  ( $E$  определено в пункте 2, а  $E'$  в пункте 5 расчета для одних и тех же значений тока якоря и потока в зазоре).

Следует провести в работе полный расчет частоты вращения двигателя для всех заданных значений тока якоря; затем результаты занести в табл. Г.

По данным табл. Г строится электромеханическая характеристика  $n = f(I_a)$ .

**Расчет электромеханической характеристики** Таблица Г.

|            |  |  |  |  |  |
|------------|--|--|--|--|--|
| $I_a$      |  |  |  |  |  |
| $E$        |  |  |  |  |  |
| $I_{в.д.}$ |  |  |  |  |  |
| $I_{в.}$   |  |  |  |  |  |
| $E'$       |  |  |  |  |  |
| $n$        |  |  |  |  |  |

**Данные для расчета шагов секций обмотки**

Таблица 2.1

| Параметры                      | Номер варианта |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|--------------------------------|----------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                | 0              | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  |
| Число полюсов $2p$             | 4              | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  | 4  |
| Число параллельных ветвей $2a$ | 2              | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 4  | 4  | 4  | 4  |
| Число пазов якоря $Z$          | 27             | 31 | 33 | 29 | 37 | 29 | 38 | 46 | 54 | 42 |
| Число коллекторных пластин $K$ | 27             | 31 | 33 | 29 | 37 | 29 | 38 | 46 | 54 | 42 |

**Номинальные данные генераторов при напряжении 230 В и частоте вращения  $n = 1500$  об/мин**

Таблица 2.2

| Величины                                                                              | Номер варианта |      |      |      |      |      |       |       |       |      |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------------|------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|
|                                                                                       | 0              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5    | 6     | 7     | 8     | 9    |
| Номинальная мощность $P_{н.и.}$ , кВт                                                 | 4,0            | 5,5  | 7,5  | 11   | 15   | 18,5 | 22    | 30    | 45    | 55   |
| Ток обмотки возбуждения при холостом ходе $I_{в.о.и.}$ , А                            | 0,8            | 0,9  | 0,95 | 1,0  | 1,07 | 1,5  | 1,7   | 2,2   | 2,8   | 3,2  |
| Реакция якоря при номинальном токе якоря в масштабе тока возбуждения $I_{в.а.и.}$ , А | 0,1            | 0,11 | 0,12 | 0,18 | 0,19 | 0,25 | 0,35  | 0,40  | 0,45  | 0,50 |
| Сопротивление обмотки якоря $r_{я.и.}$ , Ом                                           | 0,55           | 0,34 | 0,20 | 0,14 | 0,1  | 0,09 | 0,065 | 0,06  | 0,04  | 0,03 |
| Сопротивление обмотки добавочных полюсов $R_{д.и.}$ , Ом                              | 0,23           | 0,13 | 0,08 | 0,05 | 0,04 | 0,03 | 0,02  | 0,016 | 0,015 | 0,01 |
| Сопротивление обмотки возбуждения $r_{в.и.}$ , Ом                                     | 165            | 135  | 120  | 115  | 110  | 75   | 65    | 50    | 45    | 35   |

| Величины                                                 | Номер варианта |      |      |      |      |     |      |      |      |      |
|----------------------------------------------------------|----------------|------|------|------|------|-----|------|------|------|------|
|                                                          | 0              | 1    | 2    | 3    | 4    | 5   | 6    | 7    | 8    | 9    |
| Номинальная частота вращения $n$ , об/мин                | 750            | 1000 | 1500 | 2200 | 3000 | 750 | 1000 | 1500 | 2200 | 3000 |
| Номинальное напряжение генератора $U_n$ , В              | 230            | 230  | 230  | 230  | 230  | 115 | 115  | 115  | 115  | 115  |
| Номинальное напряжение в режиме двигателя $U_{н.д.}$ , В | 220            | 220  | 220  | 220  | 220  | 110 | 110  | 110  | 110  | 110  |

*Примечание.* Если напряжение и частота вращения генератора, взятые из табл. 3, не равны: соответственно 230 В и 1500 об/мин, то номинальные данные рассчитывают согласно указаниям по определению исходных данных.

## 2.2. Примеры решения задач практических занятий по разделу «Машины постоянного тока»

**Задача 2.1.** *Рассчитать шаги, на основе таблицы соединений секционных сторон обмотки якоря построить плоскостную развертку замкнутой равносекционной двухслойной обмотки машины постоянного тока.*

### Определение обмоточных данных

Вариант №\*

Исходные данные обмотки:  $2p = 2$ ;  $2a = 4$   $Z = 12$ ;  $K = 12$ .

Тип обмотки – простая петлевая равносекционная, поскольку  $2a = 2p$ , а  $Z$  и  $K$  – четные.

Число элементарных пазов равно числу коллекторных пластин

$$Z_{эл} = K;$$

Число секций равно числу коллекторных пластин

$$S = K = 12;$$

число элементарных пазов в одном реальном пазу

$$u = \frac{Z_{эл}}{Z} = \frac{K}{Z} = \frac{12}{12} = 1.$$

Расчет шагов обмотки

Первый частичный шаг по реальным пазам,

$$y_{1.z.} = \frac{Z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{12}{2} \pm 0 = 6,$$

и, поскольку  $\varepsilon$  – число долей паза, дополняющее шаг по реальным пазам до целого числа, равно 0, он является диаметральной.

Первый частичный шаг по элементарным пазам равносекционной обмотки

$$y_1 = y_{1.z.} u = 6 \cdot 1 = 6.$$

Результирующий шаг, равный шагу по коллектору, для простой петлевой правоходовой обмотки

$$y = y_k = +1.$$

Второй частичный шаг

$$y_2 = y_1 - y_k = 6 - 1 = 5.$$

Секции обмотки принимаем одновитковыми  $w_s = 1$ .

Построение плоскостной развертки обмотки

Раскатываем якорь и коллектор в плоскость, размечая пазы и коллекторные пластины и проставляя их номера. Проводники, находящиеся в верхнем слое пазы указываем контурными линиями, а в нижнем слое – пунктирными.

1-й верхний проводник соединяем с 7-м нижним (т.к.  $y_1=6$ ), 7-ой нижний – со 2-м верхним (т.к.  $y_2=5$ ). Середина последнего соединения подводится к коллекторной пластине 2 (номер коллекторной пластины и номер присоединяемой к ней верхней стороны секции должны соответствовать). Далее 2-ой верхний проводник соединяем с 8-м нижним и через коллекторную пластину 3 с 3-м верхним и т.д., в итоге обмотка должна замкнуться.

На развернутой схеме размечаем полюсы. В проводниках под полюсами указываем направление индуцируемых в них ЭДС, руководствуясь «правилом ладони правой руки». Направления ЭДС определяем, задаваясь направлением вращения якоря и считая, что полюсы находятся над обмоткой. Важным моментом здесь является расстановка щеток. Щетки на коллекторе располагаются на равном расстоянии по осям полюсов, как и в реальной машине. При этом щетки через коллекторные пластины соединяются с секциями обмотки, активные стороны которых находятся в межполюсных промежутках на линии "геометрической нейтрали".

На рисунке 2.2 представлена развернутая схема данной простой правоходовой (нескращенной) петлевой обмотки с диаметральной шаг.

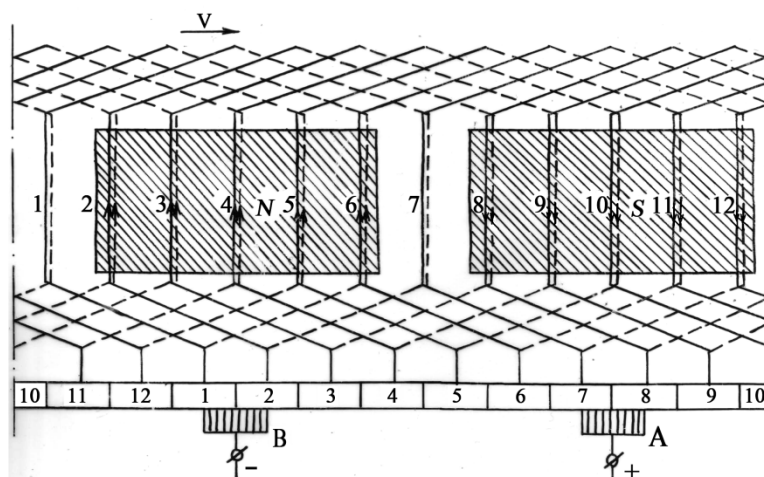


Рисунок 2.2 – Плоскостная развертка простой петлевой обмотки

### Определение данных для расчета характеристик машин постоянного тока

Поскольку напряжение и частота вращения генератора, взятые из табл. 2.3, не равны: соответственно 230 В и 1500 об/мин, то номинальные данные пересчитываем.

а) номинальная мощность

$$P_{H.} = P_{H.л.} \cdot \frac{n_{H.}}{1500} = 5,5 \cdot \frac{3000}{1500} = 11,0 \text{ кВт}$$

где  $P_{H.л.} = 5,5 \text{ кВт}$  - исходное значение мощности, равное значению, указанному в табл. 2.2;

$n_{H.} = 3000$  - номинальная частота вращения из табл. 2.3.

**Исходные номинальные данные генераторов при напряжении 230 В и частоте вращения  $n = 1500$  об/мин, (вариант №\*)**

Фрагмент таблицы 2.2

| Параметры                                                                             | Значение |
|---------------------------------------------------------------------------------------|----------|
| Номинальная мощность $P_{н.и.}$ , кВт                                                 | 5,5      |
| Ток возбуждения при холостом ходе $I_{в.о.и.}$ , А                                    | 0,8      |
| Реакция якоря при номинальном токе якоря в масштабе тока возбуждения $I_{в.а.и.}$ , А | 0,2      |
| Сопротивление обмотки якоря $r_{я.и.}$ , Ом                                           | 0,55     |
| Сопротивление обмотки добавочных полюсов $R_{д.и.}$ , Ом                              | 0,23     |
| Сопротивление обмотки возбуждения $r_{в.и.}$ , Ом                                     | 165      |

**Номинальные частоты вращения и напряжения машин постоянного тока, (вариант №\*\*)**

Фрагмент таблицы 2.3

| Параметры                                                 | Значение |
|-----------------------------------------------------------|----------|
| Номинальная частота вращения $n_n$ , об/мин               | 3000     |
| Номинальное напряжение генератора $V_n$ , В               | 115      |
| Номинальное напряжение в режиме двигателя, $V_{н.д.}$ , В | 110      |

б) ток возбуждения при холостом ходе

$$I_{в.о.} = I_{в.о.и.} \cdot \left( \frac{230}{V_{н.}} \right) = 0,8 \cdot \frac{230}{115} = 1,6 \text{ А},$$

где  $I_{в.о.и.}$  - исходное значение тока возбуждения (фрагмент табл. 2.2);

$V_{н.}$  - номинальное напряжение в режиме генератора (фрагмент табл. 2.3);

в) реакция якоря при номинальном токе якоря в масштабе тока возбуждения

$$I_{в.а.} = I_{в.а.и.} \cdot \left( \frac{230}{V_{н.}} \right) = 0,2 \cdot \frac{230}{115} = 0,4 \text{ А},$$

где  $I_{в.а.и.}$  - исходное значение реакции якоря (фрагмент табл. 2.2);

$V_{н.}$  - номинальное напряжение в режиме генератора (фрагмент табл. 2.3);

г) сопротивление обмотки якоря

$$r_{я.} = r_{я.н.} \left( \frac{1500}{n_{н.}} \cdot \frac{V_{н.}}{230} \right)^2 = 0,55 \left( \frac{1500 \cdot 115}{3000 \cdot 230} \right)^2 = 0,0344 \text{ Ом},$$

где  $r_{я.н.}$  - исходное значение сопротивления обмотки якоря (фрагмент табл. 2.2);

$V_{н.}$  - номинальное напряжение в режиме генератора (фрагмент табл. 2.3);

$n_{н.} = 3000$  об/мин - номинальная частота вращения из фрагмента табл.3;

д) сопротивление обмотки добавочных полюсов

$$r_{д.} = r_{д.н.} \left( \frac{1500}{n_{н.}} \cdot \frac{V_{н.}}{230} \right)^2 = 0,23 \left( \frac{1500 \cdot 115}{3000 \cdot 230} \right)^2 = 0,0144 \text{ Ом},$$

где  $r_{д.н.}$  - исходное значение сопротивления обмотки добавочных полюсов (фрагмент табл. 2.2);

$V_{н.}$  - номинальное напряжение в режиме генератора (фрагмент табл. 2.3);

$n_{н.} = 3000$  об/мин - номинальная частота вращения из фрагмента табл. 2.3;

е) сопротивление обмотки возбуждения

$$r_{в.} = r_{в.н.} \left( \frac{V_{н.}}{230} \right)^2 = 165 \left( \frac{115}{230} \right)^2 = 41,25 \text{ Ом},$$

где  $r_{в.н.}$  - исходное значение сопротивления обмотки возбуждения (фрагмент табл. 2.3).

$V_{н.}$  - номинальное напряжение в режиме генератора (фрагмент табл. 2.3).

После проведения расчетов результаты заносим в табл. А1

Номинальные исходные данные.

Таблица А1

| $P_{н.}$<br>кВт | $n_{н.}$<br>об./мин | $V_{н.}$<br>В | $V_{н.д}$<br>В | $I_{в.о.}$<br>А | $I_{в.а.}$<br>А | $r_{я.}$<br>Ом | $r_{д.}$<br>Ом | $r_{в.}$<br>Ом |
|-----------------|---------------------|---------------|----------------|-----------------|-----------------|----------------|----------------|----------------|
| 11,0            | 3000                | 115           | 110            | 1,6             | 0,4             | 0,034          | 0,014          | 41,25          |

**Задача 2.2.** Построить характеристику холостого хода и характеристический треугольник, соответствующий номинальному режиму генератора. Определить ток возбуждения и сопротивление реостата в цепи возбуждения генератора параллельного возбуждения при номинальной нагрузке.

### 2.2.1. Построение характеристики холостого хода

Для построения характеристики холостого хода следует использовать данные табл. Б.1

Типичная (базисная) характеристика холостого хода в относительных единицах.

Таблица Б.1

| $I_B^*$ | 0    | 0,5  | 1,0 | 1,5  | 2,0  | 2,5  | 3,0  | 3,5  |
|---------|------|------|-----|------|------|------|------|------|
| $E^*$   | 0,05 | 0,75 | 1,0 | 1,12 | 1,20 | 1,26 | 1,30 | 1,33 |

Характеристику холостого хода пересчитываем в натуральных единицах. Пересчет данных производим по формулам

$$I_B = I_B^* \cdot I_{B.O.}; \quad E = E^* \cdot V_H.$$

а результаты вычислений заносим в таблицу В.1

Характеристика холостого хода генератора. Таблица В.1

|          |      |       |     |     |     |       |       |       |
|----------|------|-------|-----|-----|-----|-------|-------|-------|
| $I_B, A$ | 0    | 0,8   | 1,6 | 2,4 | 3,2 | 4     | 4,8   | 5,6   |
| $E, B$   | 5,75 | 86,25 | 115 | 128 | 138 | 144,9 | 149,5 | 153,0 |

Номинальный ток якоря определяем по выражению

$$I_{\text{я.н.}} = \frac{P_H}{V_H} \cdot 10^3 = \frac{11}{115} \cdot 10^3 = 95,7 \text{ А.}$$

Строим характеристику холостого хода на мм-бумаге, нанося расчетные точки и соединяя их, плавной кривой.

### 2.2.2. Построение характеристического треугольника

Отмечаем на характеристике холостого хода (рис. 2.3) точку с ординатой  $V_H = 115 \text{ В}$  и абсциссой  $I_{B0} = 1,6 \text{ А}$ , которая соответствует режиму холостого хода при номинальном напряжении генератора.

Падение напряжения в цепи якоря и щеточном контакте, находим по формуле

$$E_H - V_H = I_{Я.Н.} (r_{Я} + r_{Д}) + \Delta V_{щ} = 95,7(0,034 + 0,014) + 2,0 = 6,6В,$$

где  $\Delta V_{щ}$  - падение напряжения в щеточном контакте

(следует принять  $\Delta V_{III} = 2B$ ).

Откладываем в масштабе это значение падения напряжения, равное 6,6 В по оси ординат вверх от точки  $I_H = 115$  В и из этой точки проводим горизонталь до пересечения с характеристикой холостого хода в точке  $A_H$ .

Ток  $I_{B.A.} = 0,4$  А определен ранее при расчете номинальных данных генератора (табл. А).

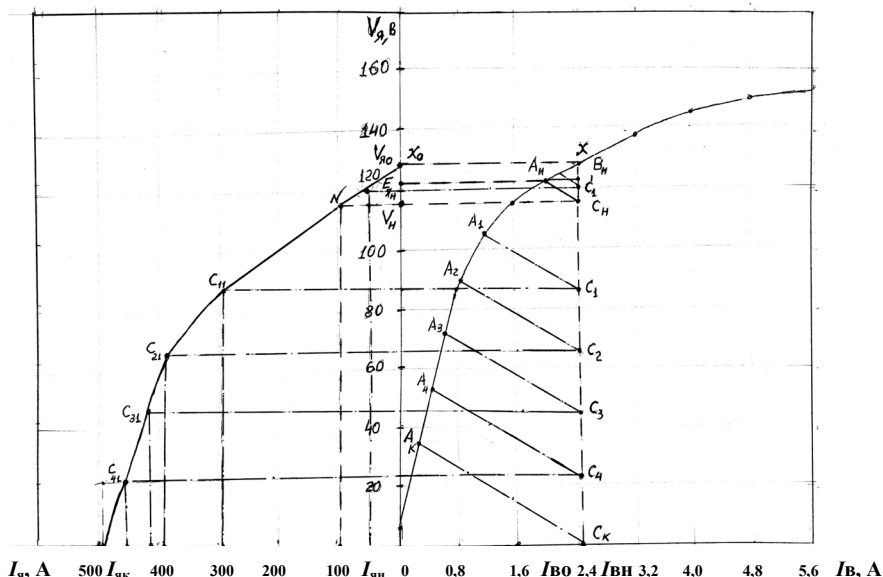


Рисунок 2.3 - Построение внешней характеристики генератора постоянного тока с независимым возбуждением по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику

Отрезок, который ему соответствует откладываем в масштабе, принятом для тока возбуждения по горизонтали от точки  $A_H$  и получаем точку  $B_H$ . Таким образом, определяем катет  $A_H B_H$ .

Из точки  $B_H$  проводим вертикаль, на которой откладываем в соответствующем масштабе от точки  $B_H$  величину падения напряжения  $E_H - I_H = 6,6$  В в цепи якоря и щеточном контакте, отмечаем точку  $C_H$ . Таким образом, определяем катет  $B_H C_H$ . Соединяя точки  $A_H$  и  $C_H$  получаем гипотенузу  $A_H C_H$ . Характеристический треугольник вычерчен.

Пересечение же вертикали, проведенной из точки  $B_H$  с осью абсцисс в точке  $I_{B.H.}$  определяет значение тока возбуждения  $I_{B.H.} = 2,44$  А. при номинальной нагрузке и номинальном напряжении на зажимах генератора.

По заданному напряжению  $V_H$  генератора и найденному номинальному току возбуждения  $I_{B.H.}$  в соответствии с законом Ома для цепи постоянного тока находим сопротивление цепи возбуждения

$$R_{ц.в} = \frac{V_H}{I_{B.H.}} = \frac{115}{2,44} = 47,2 \text{ Ом},$$

а затем и сопротивление регулировочного реостата в цепи  $R_{p.в.}$

$$R_{p.в.} = R_{ц.в.} - r_B = 47,3 - 41,25 = 5,95 \text{ Ом}.$$

**Задача 2.3** Построить внешние характеристики генераторов с независимым и параллельным возбуждением. Определить для них номинальное изменение напряжения.

### 2.3.1. Построение внешних характеристик генератора с независимым возбуждением

Для построения внешних характеристик используем характеристику холостого хода и характеристический треугольник, построенный в задаче 2.2

Построение внешних характеристик - задача графоаналитическая, токи якоря  $I_X$  для всех выбранных точек рассчитываем аналитически по соотношению

$$I_X = I_{я.н.} \cdot \frac{\overline{A_X C_X}}{\overline{A_H C_H}} = 95,7 \times \frac{\overline{A_X C_X}}{\overline{A_H C_H}}, \text{ А}, \quad (*)$$

где  $I_{я.н.} = 95,7$  - номинальное значение тока якоря;

$\overline{A_H C_H} = 12,5 \text{ мм}$ ,  $\overline{A_X C_X}$  - гипотенузы характеристического треугольника определенные в номинальном и искомом режимах соответственно.

Внешние характеристики строим полностью от режима холостого хода и до режима короткого замыкания, при этом рассчитываем не менее 4-6 точек характеристики, включая режимы: холостого хода, номинального, короткого замыкания.

Внешнюю характеристику для генератора независимого возбуждения строим при неизменном токе возбуждения  $I_{B.H.}$

Вначале определяем ток короткого замыкания. Ему соответствует характеристический треугольник  $A_K B_K C_K$  или его гипотенуза  $\overline{A_K C_K} = 65 \text{ мм}$ , полученные путем параллельного переноса (при условии, что точка  $A$  скользит по характеристике холостого хода, а катет  $\overline{BC}$  по вертикали) в положение, при котором точка  $C_K$  расположена на оси абсцисс (рис. 2.3), тогда

$$I_K = I_{я.н.} \cdot \frac{\overline{A_K C_K}}{\overline{A_H C_H}} = 95,7 \times \frac{65}{12,5} = 497,6 \text{ А}.$$

Далее проводим ось абсцисс в левой полуплоскости графика, выбираем масштаб для тока якоря и оцифровываем ее.

Таким образом, известны три точки внешней характеристики:

- точка режима холостого хода  $X_0$ , лежащая на оси  $Y$ , ордината которой определяется точкой пересечения перпендикуляра, восстановленного из т.  $I_{B0} = 2,44$  А, с характеристикой холостого хода;
- точка номинального режима с координатами  $I_{я.н.} = 95,7 \text{ А}$ ;  $V_H = 115 \text{ В}$ ;
- точка короткого замыкания с координатами  $I_{я.к} = 495,7 \text{ А}$ ;  $V_H = 0 \text{ В}$ .

Остальные точки внешней характеристики определяются следующим образом.

Параллельным переносом гипотенузы характеристического треугольника  $A_H B_H C_H$  получаем точки ее пересечения с вертикалью  $C_1, C_2, C_3, C_4, C_K$  – для токов, превышающих номинальное значение  $I_{я.н.}$  и  $C'_1$  – для тока  $0,5I_{я.н.}$ .

Ординаты точек  $C'_1, C_1, C_2, C_3, C_4, C_K$  определяют напряжение на зажимах обмотки якоря при нагрузке, а величины токов якоря находятся в соответствии с выражением (\*). Результаты расчетов сводим в таблицу 2.4.

| Данные для построения внешней характеристики. |      |      |       |       |       | Таблица 2.4 |       |
|-----------------------------------------------|------|------|-------|-------|-------|-------------|-------|
| $I_{я}, В$                                    | 120  | 115  | 86    | 65    | 46    | 24          | 0     |
| $I_{я}, А$                                    | 47,9 | 95,7 | 287,0 | 382,8 | 421,0 | 459,4       | 487,6 |
| $\frac{A_X C_X}{A_H C_H}$                     | 0,5  | 1    | 3     | 4     | 4,4   | 4,8         | 5,2   |

По данным табл. 2.4 на поле графика наносим точки и по ним проводим плавную кривую внешней характеристики  $V_{я} = f(I_{я})$  при  $I_{в.н.} = \text{const}$ .

### 2.3.2. Построение внешних характеристик генератора с параллельным самовозбуждением

Для построения внешних характеристик также используем характеристику холостого хода и характеристический треугольник, построенный в задаче 2.2

Внешнюю характеристику для генератора параллельного возбуждения строим при неизменном сопротивлении в цепи возбуждения. Токи якоря  $I_X$  для всех выбранных точек рассчитываем также аналитически по соотношению

$$I_X = I_{я.н.} \cdot \frac{A_X C_X}{A_H C_H} = 95,7 \times \frac{A_X C_X}{A_H C_H}, А,$$

где  $I_{я.н.} = 95,7$  - номинальное значение тока якоря;

$\frac{A_H C_H}{A_X C_X} = 12,5_{\text{мм}}$ ,  $\frac{A_X C_X}{A_H C_H}$  - гипотенузы характеристического треугольника соответственно в номинальном и искомом режимах.

Внешние характеристики строим полностью от режима холостого хода и до режима короткого замыкания, при этом рассчитываем не менее 4-6 точек характеристики, включая режимы: холостого хода, номинальный, короткого замыкания и критический.

Прямая вольтамперной характеристики цепи возбуждения проводится через начало координат и точку  $C_H$  характеристического треугольника (рис. 2.4).

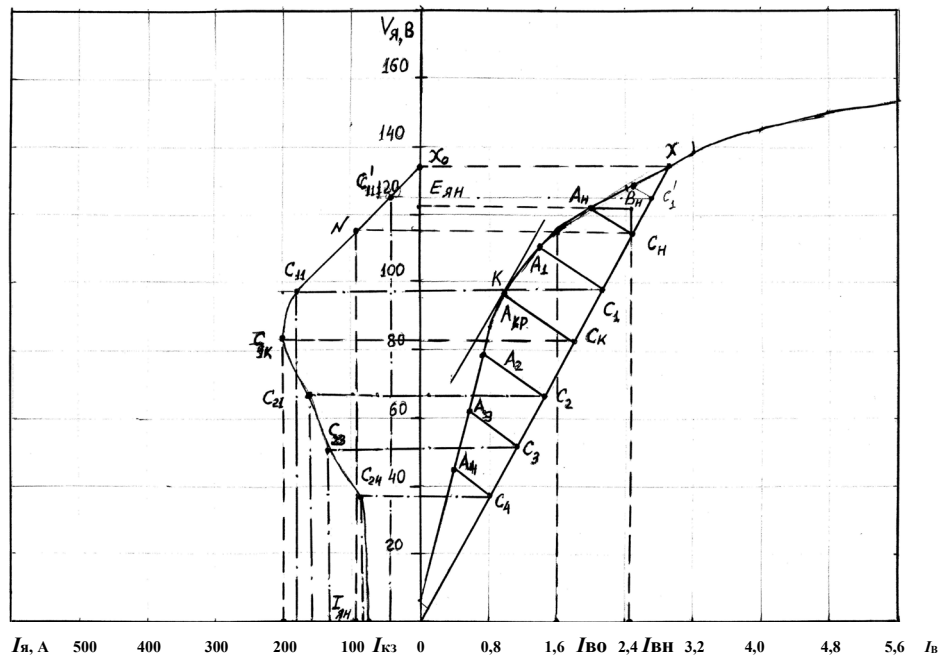


Рисунок 2.4 - Построение внешней характеристики генератора постоянного тока с параллельным самовозбуждением по характеристике холостого хода и характеристическому треугольнику

Известны две точки внешней характеристики:

- точка режима холостого хода  $X_0$ , лежащая на оси  $Y$ , ордината которой определяется точкой  $X$  пересечения прямой  $OX$  вольтамперной характеристики цепи возбуждения с характеристикой холостого хода;
- точка номинального режима с координатами  $I_{я.н.} = 95,7 \text{ А}$ ;  $V_n = 115 \text{ В}$ ;

Остальные точки внешней характеристики определяются следующим образом (рис.2.4).

Параллельным переносом гипотенузы характеристического треугольника  $A_n B_n C_n$  получаем точки ее пересечения с прямой вольтамперной характеристики цепи возбуждения  $I_B R_{цв} = f(I_B)$   $C_1, C_k, C_2, C_3, C_4$  – для токов, превышающих номинальное значение  $I_{я.н.}$  и  $C'_1$  – для тока  $0,5I_{я.н.}$ . Ординаты точек  $C'_1, C_1, C_k, C_2, C_3, C_4$ , определяют напряжение на зажимах обмотки якоря при нагрузке, а величины токов якоря находятся в соответствии с выражениями (\*). Результаты расчетов сводятся в таблицу.

При определении критической точки внешней характеристики генератора параллельного возбуждения необходимо провести касательную к характеристике холостого хода параллельно линии  $OX$

$$I_B R_{цв} = f(I_B).$$

Точка  $A_{к.р.}$  характеристического треугольника для критического режима должна находиться в точке касания  $K$  (рис. 2.4).

При определении тока короткого замыкания генератора параллельного возбуждения следует исходить из уравнения

$$V = E - I_{я}(r_{я} + r_{д}) - \Delta V_{щ},$$

а поскольку при коротком замыкании  $V = 0$ , а  $E = E_0$ , ток короткого замыкания определяем по выражению

$$I_{к.з.} = \frac{E_0 - \Delta V_{щ}}{r_{я} + r_{д}} = \frac{5,75 - 2}{0,034 + 0,014} = 78,1 \text{ А}.$$

Как видим ток короткого замыкания меньше номинального тока якоря.

**Данные для построения внешней характеристики генератора постоянного тока с параллельным самовозбуждением**

Таблица 2.5

|                           |      |      |      |      |       |       |      |
|---------------------------|------|------|------|------|-------|-------|------|
| $I_{я}, В$                | 125  | 115  | 97   | 84   | 66    | 50    | 37,0 |
| $I_{я}, А$                | 47,9 | 95,7 | 176  | 200  | 168,4 | 137,8 | 99,5 |
| $\frac{A_x C_x}{A_n C_n}$ | 0,5  | 1    | 1,84 | 2,08 | 1,76  | 1,44  | 1,04 |

По данным табл. 2.5 на поле графика наносим точки и по ним проводим плавную кривую внешней характеристики генератора с параллельным самовозбуждением  $V_{я} = f(I_{я})$  при  $R_{цв} = \text{const}$ .

Электромеханическая характеристика  $n = f(I)$  машины постоянного тока, работающей в режиме электродвигателя с параллельным возбуждением, аналитически выражается уравнением

$$n = \frac{V_{н.д.} - I_{я}(r_{я} + r_{д}) - \Delta V_{щ}}{C_e \Phi}.$$

Для определения электромеханической характеристики применим косвенный метод, для которого используем характеристику холостого хода машины при номинальной частоте вращения построенную с помощью базисной характеристики (табл. Б).

В качестве исходных данных принимаются: номинальные данные машины постоянного тока (табл. А); уточненный номинальный ток якоря  $I_{я.н.}$ ; напряжение  $V_{н.д.} = 110 В$  по табл. 2.3.

Ток возбуждения двигателя

$$I_{в.д.} = \frac{V_{н.д.}}{r_{в.}} = \frac{110}{41,25} = 2,67 А.$$

Характеристику холостого хода (таблица Б1) пересчитываем в натуральных единицах. Пересчет данных производим по формулам

$$I_B = I_{в.д.}^* \cdot I_{в.д.}; E = E^* \cdot V_{н.д.}.$$

а результаты вычислений заносим в таблицу 6.

Характеристика холостого хода двигателя Таблица.2.6

|          |      |      |       |       |       |       |
|----------|------|------|-------|-------|-------|-------|
| $I_B^*$  | 0    | 0,5  | 1,0   | 1,5   | 2,0   | 2,5   |
| $I_B, А$ | 0    | 1,34 | 2,67  | 4,0   | 5,34  | 6,68  |
| $E^*$    | 0,05 | 0,75 | 1,0   | 1,12  | 1,20  | 1,26  |
| $E, В$   | 5,5  | 82,5 | 110,0 | 123,2 | 132,0 | 138,6 |

Номинальный ток якоря определяем по выражению

$$I_{я.н.} = \frac{P_H}{V_H} \cdot 10^3 = \frac{11}{110} \cdot 10^3 = 100 \text{ А.}$$

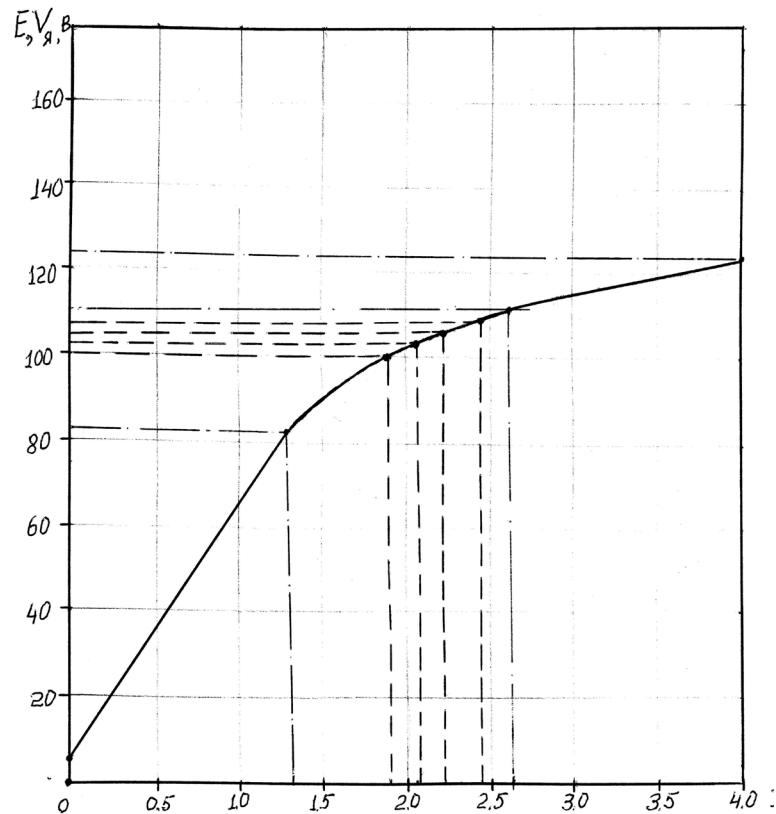


Рисунок 2.5 - Характеристика холостого хода двигателя постоянного тока

Последовательность расчета электромеханической характеристики следующая.

1. Задаемся значениями тока якоря:

$$I = 0; 0,5 I_{я.н.}; I_{я.н.}; 1,5 I_{я.н.}; 2 I_{я.н.}.$$

2. Для каждого значения тока якоря определяем ЭДС при неизвестном значении частоты вращения  $n$ , пользуясь уравнением

$$E = V_{H.д.} - I_{я.} (r_{я.} + r_{д.}) - \Delta V_{щ.},$$

При  $I_{я.} = 0$  падение напряжения под щетками принимается равным нулю, а при остальных токах - равным 2В.

3. Определяем ток возбуждения двигателя

$$I_{B.д.} = \frac{V_{H.д.}}{r_{B.}} = \frac{110}{41,25} = 2,67 \text{ А.},$$

4. Для каждого значения тока якоря находим часть тока возбуждения двигателя, обеспечивающую создание рабочего потока  $\Phi$  в воздушном зазоре с учетом действия реакции якоря

$$I'_B = I_{B.д.} - I_{B.A} \frac{I_{я.}}{I_{я.н.}},$$

причем ток  $I_{B.A.}$  принимается по табл. А.

5. Для каждого значения тока  $I_B$  по характеристике холостого хода (рис.2.5) определяем ЭДС  $E'$ , которая была бы при вращении машины с частотой вращения якоря  $n$ .

6. Для каждого значения тока якоря находим частоту вращения двигателя по соотношению  $n = n_H \frac{E}{E'}$ ,

Оно получено из отношения выражений  $E = C_e n \Phi$  и

$E' = C_e n_H \Phi'$  ( $E$  определено в пункте 2, а  $E'$  в пункте 5 данного расчета для одних и тех же значений тока якоря и потока в зазоре).

Проведем полный расчет частоты вращения двигателя для всех заданных значений тока якоря; затем результаты занесем в табл. Г. По данным табл. Г1 строим электромеханическую характеристику  $n = f(I_A)$ , приведенную на рис. 2.6. По результатам расчетов формулируем выводы.

Результаты расчета электромеханической характеристики Таблица Г1

| $I_A, A$                                                         | 0      | 50,0  | 100,0 | 150,0 | 200,0 |
|------------------------------------------------------------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| $E = V_{H.Д.} -$<br>$- I_A (r_A + r_D) -$<br>$- \Delta V_{щ}, B$ | 110    | 105,6 | 103,2 | 100,8 | 98,4  |
| $I_{B.Д.} = \frac{V_{H.Д.}}{r_B}, A$                             | 2,67   | 2,67  | 2,67  | 2,67  | 2,67  |
| $I'_B = I_{B.Д.} -$<br>$- I_{B.A.} \frac{I_A}{I_{A.H.}}, A$      | 2,67   | 2,47  | 2,27  | 2,07  | 1,87  |
| $E' = f(i'_B), B$                                                | 110    | 108   | 106   | 104   | 102   |
| $n = n_H \frac{E}{E'}$ ,<br>об/мин                               | 3000,0 | 2933  | 2920  | 2907  | 2894  |

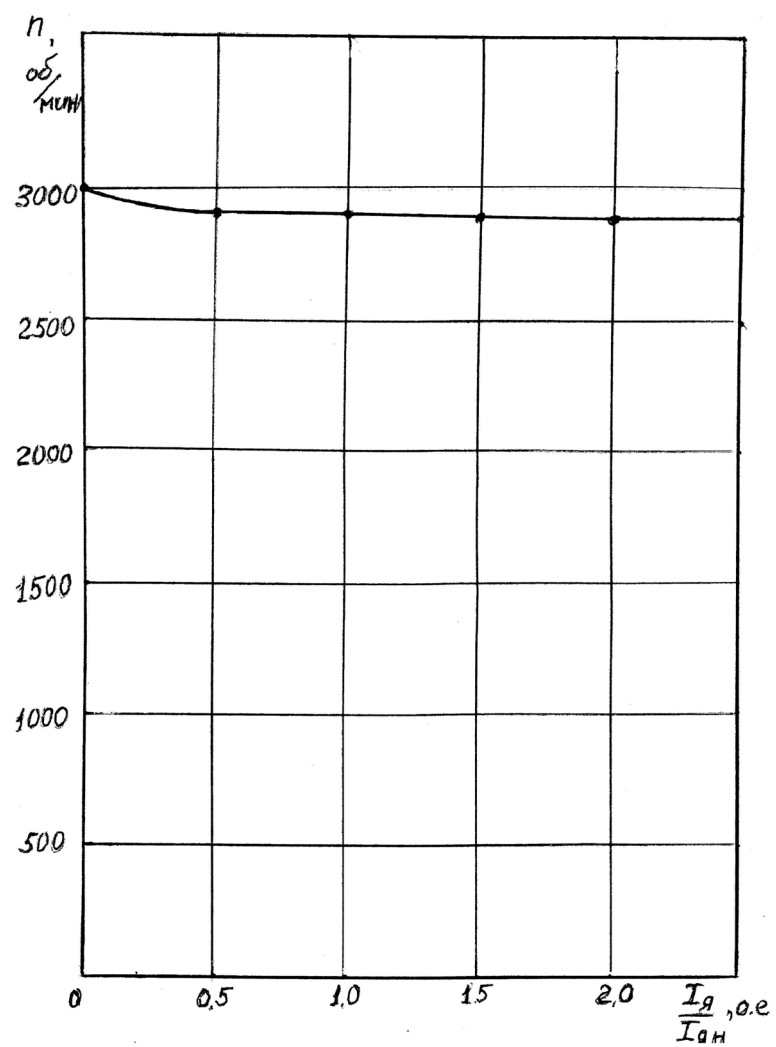


Рис. 2.6 - Электромеханическая характеристика двигателя постоянного тока

### Выводы

- 1.
- 2.
- 3.
- 4.

### 3. ЗАДАЧИ ПРАКТИЧЕСКИХ ЗАНЯТИЙ ПО РАЗДЕЛУ «СУДОВЫЕ ТРАНСФОРМАТОРЫ»: ЗАДАНИЯ, МЕТОДИКА, ПРИМЕРЫ РЕШЕНИЯ

#### 3.1. Методика и задания, таблицы исходных данных для выполнения задач практических занятий по разделу «Судовые трансформаторы»

Задача 3.1. *Определить фазные и линейные значения напряжений и токов в номинальном режиме.*  
Задача 3.2. *Определить параметры схемы замещения, приведенные к первичной обмотке, активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания. Начертить схему замещения.*  
Задача 3.3. *Определить число вольт на один виток обмотки. Рассчитать и построить внешнюю характеристику трансформатора при:*

*а)  $\cos \varphi_2 = 1$  (активная нагрузка); б)  $\cos \varphi_2 = 0,707$  (индуктивная нагрузка).*

Задача 3.4. *Рассчитать и построить зависимость к.п.д. трансформатора от активной вторичной мощности при:  $\cos \varphi_2 = 1$  (активная нагрузка) и  $\cos \varphi_2 = 0,707$  (индуктивная нагрузка) Определить долевое значение нагрузки, соответствующее максимальному КПД.*

Задача 3.5. *Трансформатор включен на параллельную работу с другими такими же трансформаторами. Определить распределение нагрузок и допустимую суммарную нагрузку при  $\cos \varphi = 0,8$  для следующих случаев:*

*а) один из трансформаторов включен на отклонение +5%, т.е. коэффициент трансформации увеличен на 5%; другой - на отклонение соответствующее номинальному напряжению. Для этого случая построить векторную диаграмму в масштабе;*

*б) напряжение короткого замыкания одного из трансформаторов равно 1,2 номинального напряжения короткого замыкания другого трансформатора.*

Задача 6. *Рассчитать наибольшее мгновенное значение тока короткого замыкания.*

**Примечание.** *Первичной обмоткой считается обмотка высшего напряжения, присоединенная к питающей сети.*

#### Определение исходных данных

Вариант задания на практическую работу студент выбирает в соответствии с табл. 1. Мощность трансформатора берут по последней цифре номера зачетной книжки, а первичное напряжение - с учетом последней и предпоследней цифр зачетной книжки.

#### Методические указания

##### К задаче 3.1.

При определении линейных и фазных напряжений следует ознакомиться со следующей литературой:

[1, § 12-4, с. 254-258]; [2, гл.15, с. 386-399]; [3, § I-I, с. 20-21] . Коэффициент трансформации можно приблизительно считать равным отношению фазных напряжений.

Фазные значения номинальных напряжений и токов (при схеме соединения Y/Y<sub>0</sub>)

$$\begin{aligned} U_{1\text{нф}} &= \frac{U_{1\text{н}}}{\sqrt{3}} & I_{1\text{нф}} &= \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{1\text{н}}} & K &= \frac{U_{1\text{нф}}}{U_{2\text{нф}}} \\ & & & & & \text{(для схемы Y/}\Delta\text{)} \\ U_{2\text{нф}} &= \frac{U_{2\text{н}}}{\sqrt{3}} & I_{2\text{нф}} &= \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{2\text{н}}} & U_{2\text{нф}} &= U_{2\text{н}}; I_{2\text{нф}} = \frac{S_{\text{н}}}{3U_{2\text{н}}} \end{aligned}$$

##### К задаче 3.2.

Параметры схемы замещения холостого хода следует определять по току и потерям холостого хода [1, § 14-4, с. 287-292]; [2, гл.16, с. 400-406]; [3, § 2-8, с. 41-43] .

Параметры схемы замещения короткого замыкания следует определять по напряжению и потерям короткого замыкания [1, § 14-4, с. 287-292]; [2, гл. 17, с.406-418]; [3, § 52. с.79-83] .

Следует учесть, что для расчета параметров должны быть использованы фазные значения тока и напряжения, а также потери на одну фазу.

Для режима холостого хода схема замещения при  $Z'_H = \infty$  имеет вид

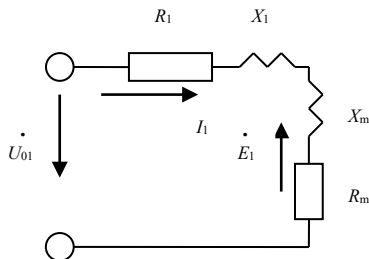


Рис.3.1 - Схема замещения для режима холостого хода ( $Z'_H = \infty$ )

Входное сопротивление трансформатора при холостом ходе

$$Z_0 = \frac{U_{01\Phi}}{I_{0\Phi}} \approx Z_m \quad R_0 = R_1 + R_m = \frac{P_{0\Phi}}{I_{0\Phi}^2} \approx R_m$$

$$U_{01\Phi} = U_{1H\Phi} \quad P_{0\Phi} = \frac{P_0}{3}$$

$$I_{0\Phi} = I_{1H\Phi} [I_0 \%] / 100\% \quad ] / 100\%$$

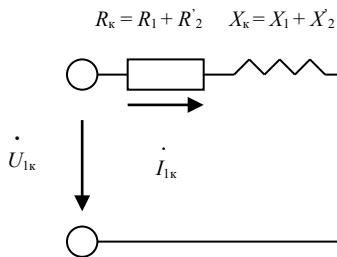


Рисунок 3.2 - Схема замещения для режима короткого замыкания ( $Z'_H = 0$ )

Входное сопротивление трансформатора при к.з.

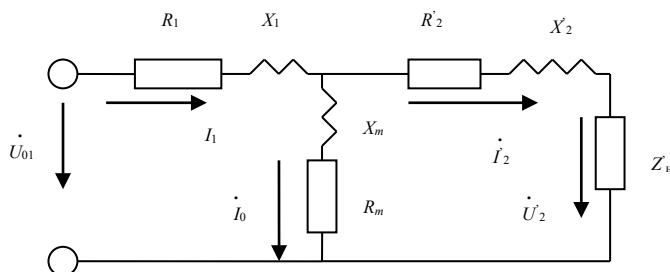
$$Z_k = \frac{U_{1k\Phi}}{I_{1k\Phi}} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} ; \quad U_{1k\Phi} = (U_{1H\Phi} [u_k] \% ) / 100\%$$

$$I_{1k\Phi} = I_{1H\Phi} \quad R_1 + R'_2 = R_k = \frac{P_{k\Phi}}{I_{1k\Phi}^2} = \frac{P_k}{3I_{1H\Phi}^2} ;$$

$$X_1 + X'_2 = X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad R_1 \approx R'_2 = \frac{R_k}{2} ; \quad X_1 = X'_2 = \frac{X_k}{2}$$

#### Допущения:

- 1) электрические потери в первичной обмотке (потери в меди) пренебрежимо малы по сравнению с магнитными потерями в сердечнике и тогда  $X_0 = X_1 + X_m = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \approx X_m$ ;
- 2) индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки пренебрежимо мало по сравнению с главным индуктивным сопротивлением, а именно:  
 $R_1 \ll R_m ; X_1 \ll X_m$ ;
- 3) сопротивление намагничивающей ветви  $Z_m \gg Z'_2$ ;
- 4) током через намагничивающую ветвь можно пренебречь;
- 5) плотности токов и средние длины витков первичной и вторичной обмоток одинаковы.



Активная составляющая напряжения к.з.:

$$[U_{1ka}] \% = (R_k I_{1H\Phi} / U_{1H\Phi}) \cdot 100 \%$$

Реактивная составляющая напряжения к.з.:

$$[U_{1kp}] \% = (X_k I_{1H\Phi} / U_{1H\Phi}) \cdot 100 \%$$

Рисунок 3.3 - Полная Т-образная схема замещения трансформатора

#### К задаче 3.3.

Величина  $U_B$  важна, так как влияет на плотность тока  $J$  и индуктивное сопротивление.

Для определения  $U_B$  следует использовать [1, § 12-1, с.243, формула 12-3]; [2, § 14-6, с.384].

Принять  $B_s = 1,6 \text{ Т}, f = 50 \text{ Гц}$  (значения сечения стержня приведены в табл.3.1.)

Для построения внешней расчетной характеристики  $U_2 = f(I_2)$  необходимо задаться рядом значений вторичных токов от нуля до номинального и для каждого из них рассчитать изменение вторичного напряжения по упрощенной зависимости

$$\Delta U_2 = I_{2\phi} \frac{R_k}{K^2} \cos \varphi_2 + I_{2\phi} \frac{X_k}{K^2} \sin \varphi_2$$

И по уточненной зависимости 
$$\Delta U_2 = I_{2\phi} \frac{R_k}{K^2} \cos \varphi_2 + I_{2\phi} \frac{X_k}{K^2} \sin \varphi_2 + \frac{I_{2\phi} \frac{X_k}{K^2} \cos \varphi_2 - I_{2\phi} \frac{R_k}{K^2} \sin \varphi_2}{2}$$

Таким образом, каждого из значений  $I_{2\phi}$  при симметричной нагрузке фаз  $U_2 = \frac{U_{1\phi}}{K} - \Delta U_2$

Данные расчетов, полагая  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ , можно свести в следующую таблицу.

Таблица А

| Вторичн. ток<br>в долях<br>от номин.<br>$\frac{I_{2\phi}}{I_{2\phi\phi}}$ | $I_{2\phi} \frac{R_k}{K^2}$ | $I_{1\phi} \frac{X_k}{K^2}$ | $I_{2\phi} \frac{R_k}{K^2} \cos \varphi_2$ | $I_{2\phi} \frac{X_k}{K^2} \sin \varphi_2$ | $I_{2\phi} \frac{X_k}{K^2} \cos \varphi_2$ | $I_{2\phi} \frac{R_k}{K^2} \sin \varphi_2$ | $\Delta U_2$<br>по упр.<br>ф. | $\Delta U_2$<br>по точ. ф. | $U_2$<br>по упр.<br>ф. | $U_2$<br>по точ.<br>ф. |
|---------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------|----------------------------|------------------------|------------------------|
| 0.25                                                                      |                             |                             |                                            |                                            |                                            |                                            |                               |                            |                        |                        |
| 0.5                                                                       |                             |                             |                                            |                                            |                                            |                                            |                               |                            |                        |                        |
| 0.75                                                                      |                             |                             |                                            |                                            |                                            |                                            |                               |                            |                        |                        |
| 1.0                                                                       |                             |                             |                                            |                                            |                                            |                                            |                               |                            |                        |                        |
| 1.25                                                                      |                             |                             |                                            |                                            |                                            |                                            |                               |                            |                        |                        |

#### К задаче 3.4.

При определении долевого значения нагрузки, соответствующего максимуму КПД, использовать [1, § 15-4, с. 308-311]; [2, § 18-10, с. 427-429]; [3, § 6-3, с. 87-88].

Для построения расчетной зависимости  $\eta = f(P_2)$  необходимо задаться рядом значений  $P_2$  от 0 до номинальной мощности и для каждого значения вычислить к.п.д. по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + K_n^2 P_k}{K_n S_n \cos \varphi_2 + P_0 + K_n^2 P_k}, \text{ где } K_n = \frac{S_2}{S_n} - \text{коэффициент нагрузки.}$$

Результат вычислений при  $\cos \varphi = \text{const}$  удобно свести в таблицу.

Таблица Б

| $K_n = \frac{S_2}{S_n}$ | $P_2 = K_n S_n \cos \varphi_2$ | $K_n^2 P_k$ | $K_n S_n \cos \varphi_2 + P_0 + K_n^2 P_k$ | $K_n P_k$ | $\frac{P_0 + K_n^2 P_k}{K_n S_n \cos \varphi_2 + P_0 + K_n^2 P_k}$ | $\eta$ |
|-------------------------|--------------------------------|-------------|--------------------------------------------|-----------|--------------------------------------------------------------------|--------|
| 0                       |                                |             |                                            |           |                                                                    |        |
| 0.25                    |                                |             |                                            |           |                                                                    |        |
| 0.5                     |                                |             |                                            |           |                                                                    |        |
| 0.75                    |                                |             |                                            |           |                                                                    |        |
| 1.0                     |                                |             |                                            |           |                                                                    |        |
| 1.25                    |                                |             |                                            |           |                                                                    |        |

Долевое значение нагрузки, соответствующее максимальному к.п.д. определяется из выражений

$$P_0 = K_n^2 P_k; \quad K_n = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}.$$

### Задания к практическим занятиям по теме «Трансформаторы» Таблица 3.1

| Исх. данн.<br>Посл. цифра зачетки | Мощность $S$ , кВА | Потери холост. хода $P_0$ , Вт | Потери корот. замык., $P_K$ , Вт | Ток хол. хода $i_0$ , % | Сеч. стержня, $S_{cm^2}$ | Напряжение $U_1/U_2$ , кВ<br>Предпоследняя цифра зачетки |          |          |          |         |
|-----------------------------------|--------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------------------------------|----------|----------|----------|---------|
|                                   |                    |                                |                                  |                         |                          | 0,1                                                      | 2,3      | 4,5      | 6,7      | 8,9     |
| 0                                 | 25                 | 105                            | 600                              | 3,2                     | 70                       | 10/0,4                                                   | 3/0,525  | 6/0,525  | 10/0,525 | 6/0,4   |
| 1                                 | 40                 | 150                            | 880                              | 3,0                     | 88                       | 10/0,525                                                 | 3/0,69   | 6/0,4    | 10/0,69  | 6/0,525 |
| 2                                 | 63                 | 220                            | 1280                             | 2,8                     | 112                      | 3/0,69                                                   | 10/0,4   | 6/0,525  | 35/0,69  | 20/0,4  |
| 3                                 | 100                | 310                            | 1970                             | 2,6                     | 140                      | 20/0,69                                                  | 3/0,525  | 10/0,4   | 6/0,4    | 35/0,69 |
| 4                                 | 160                | 460                            | 2650                             | 2,4                     | 178                      | 20/0,4                                                   | 10/0,525 | 6/0,69   | 35/0,4   | 3/0,69  |
| 5                                 | 400                | 920                            | 5550                             | 2,1                     | 280                      | 10/0,69                                                  | 20/0,4   | 35/0,525 | 3/0,4    | 6/0,525 |
| 6                                 | 1000               | 2100                           | 12200                            | 1,4                     | 435                      | 35/11                                                    | 20/3,15  | 6/0,525  | 10/0,69  | 3/0,69  |
| 7                                 | 2500               | 3900                           | 25000                            | 1,0                     | 700                      | 20/6,3                                                   | 35/3,15  | 3/0,69   | 35/11    | 10/3,15 |
| 8                                 | 4000               | 5450                           | 33500                            | 1,0                     | 880                      | 35/11                                                    | 20/3,15  | 6/3,15   | 10/0,69  | 3/0,525 |
| 9                                 | 6300               | 7650                           | 45500                            | 0,9                     | 1100                     | 20/11                                                    | 35/6,3   | 10/3,15  | 35/11    | 20/3,15 |

Для построения векторной диаграммы рекомендуется использовать литературу [1, рис.15-13, б, с.314].

Примечание. 1. При  $U_2 = 0,525; 3,15; 6,3; 11$  кВ группа соединений  $Y/\Delta$  -11

При  $U_2 = 0,4; 0,69$  кВ группа соединений  $Y/Y_0$  -12.

2. Для нечетных предпоследних цифр зачетки  $U_K = 5,5\%$ ; для четных, в том числе и для нуля, предпоследних цифр зачетки  $U_K = 6,5\%$ .

Пример. 1. Номер зачетной книжки 172971 –  $S = 40$  кВА;  $U_1/U_2 = 10/0,69$ ;  $Y/Y_0$  -12,  $U_K = 5,5\%$ .

1. Номер зачетной книжки 173824 –  $S = 160$  кВА;  $U_1/U_2 = 10/0,525$ ;  $Y/\Delta$  -11,  $U_K = 6,5\%$ .

### 3.2. Примеры решения задач практических занятий по теме «Судовые трансформаторы»

**Примечание.** Первичной обмоткой, присоединенной к питающей сети, считается обмотка высшего напряжения.

#### Исходные данные

Вариант №\* Задания на практическую работу Фрагмент таблицы 3.1

| Мощность $S$ , кВА | Потери холостого хода $P_0$ , Вт | Потери короткого замыкания $P_K$ , Вт | Ток холостого хода $i_0$ , % | Сечение стержня $S_{cm^2}$ | Напряжение $U_1/U_2$ , кВ |
|--------------------|----------------------------------|---------------------------------------|------------------------------|----------------------------|---------------------------|
| 2500               | 3900                             | 25000                                 | 1,0                          | 700                        | 10/3,15                   |

При  $U_2 = 3,15$  кВ группа соединений  $Y/\Delta$  -11; Напряжение к.з.  $[U_K] = 5,5\%$ ;

#### **Задача 3.1. Определить фазные и линейные значения напряжений и токов в номинальном режиме.**

Коэффициент трансформации приблизительно считается равным отношению фазных напряжений. Фазные значения номинальных напряжений и токов при схеме соединения  $Y/Y_0$

$$U_{1\text{нф}} = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{10}{\sqrt{3}} = 5,774 \text{ кВ}; \quad I_{1\text{нф}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3} U_1} = \frac{2500}{\sqrt{3} \times 10} = 144,3 \text{ А};$$

для схемы  $Y/\Delta$

$$k = \frac{U_1}{\sqrt{3} U_2} = \frac{10}{\sqrt{3} \times 3,15} = 1,83;$$

$$U_{2\text{нф}} = U_2 = 3,15 \text{ кВ};$$

$$I_{2\text{нф}} = \frac{S_{\text{н}}}{3 U_{2\text{нф}}} = \frac{2500}{3 \times 3,15} = 264,64 \text{ А}.$$

**Задача 3.2. Определить параметры схемы замещения, приведенные к первичной обмотке, активную и реактивную составляющие напряжения короткого замыкания. Начертить схему замещения.**

Параметры схемы замещения холостого хода определяем по току и потерям холостого хода. Параметры схемы замещения короткого замыкания определяем по напряжению и потерям короткого замыкания. Для расчета параметров должны быть использованы фазные значения тока и напряжения, а также потери на одну фазу.

Для режима холостого хода схема замещения при  $Z_n = \infty$  имеет вид, приведенный на рис. 3.4

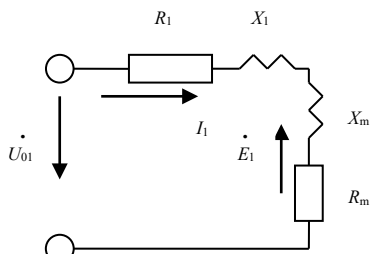


Рис.3.4 - Схема замещения для режима холостого хода ( $Z_n = \infty$ )

Входное сопротивление трансформатора при холостом ходе

$$Z_0 = \frac{U_{01\Phi}}{I_{0\Phi}} \approx Z_m = \frac{5,774}{1,443} \approx 4 \text{ кОм}$$

$$R_0 = R_1 + R_m = \frac{P_{0\Phi}}{I_{0\Phi}^2} \approx R_m = \frac{1,3}{1,443^2} = 0,624 \text{ кОм}$$

$$U_{01\Phi} = U_{1н\Phi} = 5774 \text{ В} \quad P_{0\Phi} = \frac{P_0}{3} = \frac{3900}{3} = 3300 \text{ Вт}$$

$$I_{0\Phi} = I_{1н\Phi} [I_0 \%] / 100\% = 144,3 \cdot 1 / 100 = 1,44 \text{ А}$$

Входное сопротивление трансформатора при к.з. (рис.3.5)

$$Z_k = Z_k \frac{U_{1к\Phi}}{I_{1к\Phi}} = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = \frac{317,6}{144,3} = 2,2 \text{ Ом};$$

$$U_{1к\Phi} = (U_{1н\Phi} [u_k \%]) / 100\% = 5774 \cdot 0,055 = 317,6 \text{ В}$$

$$I_{1к\Phi} = I_{1н\Phi} = 144,3 \quad R_1 + R_2 = \frac{P_{к\Phi}}{I_{1к\Phi}^2} = \frac{P_k}{3 I_{1н\Phi}^2} = \frac{25000}{3 \cdot 144,3^2} = 0,4 \text{ Ом};$$

$$X_1 + X_2 = X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{2,2^2 - 0,4^2} = 2,1 \text{ Ом}$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2} = 0,2 \text{ Ом}; \quad X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2} = 1,08 \text{ Ом};$$

$$R_2 = \frac{R_2'}{k^2} = \frac{0,2}{1,83^2} = 0,06 \text{ Ом}; \quad X_2 = \frac{X_2'}{k^2} = \frac{2,34}{1,83^2} = 0,7 \text{ Ом}.$$

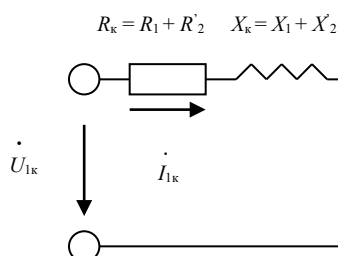


Рисунок 3.5 - Схема замещения для режима короткого замыкания ( $Z_n = 0$ )

Считаем, что

- 1) электрические потери в первичной обмотке (потери в меди) пренебрежимо малы по сравнению с магнитными потерями в сердечнике и тогда  $R_1 \ll R_m$ ;
- 2) индуктивное сопротивление рассеяния первичной обмотки пренебрежимо мало по сравнению с главным индуктивным сопротивлением, а именно:

$$X_1 \ll X_m; \quad X_0 = X_1 + X_m = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \approx X_m;$$

- 3) сопротивление намагничивающей ветви  $Z_m \gg Z_2$ ;
- 4) в режиме короткого замыкания ток через намагничивающую ветвь можно пренебречь;
- 5) плотности токов и средние длины витков первичной и вторичной обмоток одинаковы.

Полная Т-образная схема замещения трансформатора имеет вид, приведенный на рис. 3.6

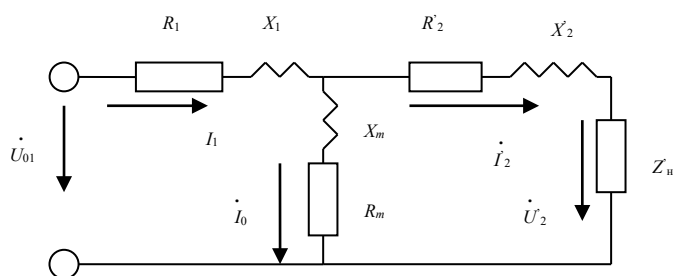


Рисунок 3.6 - Схема замещения для режима работы трансформатора под нагрузкой

Активная составляющая напряжения короткого замыкания  
 $[U_{1ка}] \% = (R_k I_{1нф} / U_{1нф}) \cdot 100 \% = (0,4 \cdot 144,3 / 5744) \cdot 100 = 1,0\%$   
 Реактивная составляющая напряжения короткого замыкания  
 $[U_{1кр}] \% = (X_k I_{1нф} / U_{1нф}) \cdot 100 \% = (2,16 \cdot 144,3 / 5744) \cdot 100 = 5,43\%$

**Задача 3.3. Определить число вольт на один виток обмотки. Рассчитать и построить внешнюю характеристику трансформатора при:**

**а)  $\cos \varphi_2 = 1$  (активная нагрузка); б)  $\cos \varphi_2 = 0,707$  (активно - индуктивная нагрузка).**

Число вольт на один виток обмотки

Величина  $U_B$  важна, так как влияет на плотность тока  $J$  и индуктивное сопротивление.  
 Для определения  $U_B$  использовать выражение для ЭДС трансформатора

$$E_1 = 4,44 w_1 f B_c S_c,$$

откуда

$$U_B \approx \frac{E_1}{w_1} = 4,44 f B_c S_c = 4,44 \times 50 \times 1,6 \times 700 \times 10^{-4} = 24,86 \text{ В}$$

Принимаем  $B_c = 1,6 \text{ Тл}$ ,  $f = 50 \text{ Гц}$  (значения  $S_c$ , приведено в табл.1.)

Внешняя характеристика трансформатора  $U_2 = f(I_2)$

Для построения внешних характеристик (рис. 3.7) задаемся рядом значений вторичных токов в натуральных или относительных единицах от нуля до номинального значения и для каждого из них рассчитываем изменение вторичного напряжения по упрощенной зависимости

$$\Delta U_2 = I_{2ф} \frac{R_k}{K^2} \cos \varphi_2 + I_{2ф} \frac{X_k}{K^2} \sin \varphi_2$$

и по уточненной зависимости

$$\Delta U_2 = I_{2ф} \frac{R_k}{K^2} \cos \varphi_2 + I_{2ф} \frac{X_k}{K^2} \sin \varphi_2 + \frac{I_{2ф} \frac{X_k}{K^2} \cos \varphi_2 - I_{2ф} \frac{R_k}{K^2} \sin \varphi_2}{2}$$

Таким образом, для каждого из значений  $I_{2ф}$  при симметричной нагрузке фаз находим  $U_2 = \frac{U_{1нф}}{K} - \Delta U_2$

Данные расчетов, полагая  $\cos \varphi_2 = \text{const}$ , можно свести в таблицы А1, А2.

Внешняя характеристика при  $\cos \varphi_2 = 1$

Таблица А1

| Вторичн.<br>ток<br>в долях<br>от<br>номинал.<br>$I_{2ф} / I_{2нф}$ | $I_{2ф} \frac{R_k}{K^2}$ | $I_{2ф} \frac{X_k}{K^2}$ | $I_{2ф} \frac{R_k}{K^2} \cos \varphi_2$ | $I_{2ф} \frac{X_k}{K^2} \sin \varphi_2$ | $I_{2ф} \frac{X_k}{K^2} \cos \varphi_2$ | $I_{2ф} \frac{R_k}{K^2} \sin \varphi_2$ | $\Delta U_2$<br>по<br>упр.<br>ф-ле | $\Delta U_2$<br>по<br>уточн.<br>ф-ле | $U_2$<br>по<br>упр.<br>ф-ле | $U_2$<br>по<br>точ.<br>ф. |
|--------------------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
| 0                                                                  | 0                        | 0                        | 0                                       | 0                                       | 0                                       | 0                                       | 0                                  | 0                                    | 3150                        | 3150                      |
| 0.25                                                               | 7,9                      | 42,7                     | 7,9                                     | 0                                       | 42,7                                    | 0                                       | 7,9                                | 29,25                                | 3142                        | 3121                      |
| 0.5                                                                | 15,8                     | 85,4                     | 15,8                                    | 0                                       | 85,4                                    | 0                                       | 15,8                               | 58,5                                 | 3134                        | 3091                      |
| 0.75                                                               | 23,7                     | 128,0                    | 23,7                                    | 0                                       | 128,0                                   | 0                                       | 23,7                               | 87,7                                 | 3126                        | 3062                      |
| 1.0                                                                | 31,6                     | 170,7                    | 31,6                                    | 0                                       | 170,7                                   | 0                                       | 31,6                               | 117,0                                | 3118                        | 3033                      |
| 1.25                                                               | 39,5                     | 213,4                    | 39,5                                    | 0                                       | 213,4                                   | 0                                       | 39,5                               | 146,2                                | 3110                        | 3004                      |

| Вторичн.<br>ток<br>в долях<br>от<br>номин.<br>$I_{2\phi}/I_{2нф}$ | $I_{2\phi} \frac{R_K}{K^2}$ | $I_{2\phi} \frac{X_K}{K^2}$ | $I_{2\phi} \frac{R_K}{K^2} \cos\varphi_2$ | $I_{2\phi} \frac{X_K}{K^2} \sin\varphi_2$ | $I_{2\phi} \frac{X_K}{K^2} \cos\varphi_2$ | $I_{2\phi} \frac{R_K}{K^2} \sin\varphi_2$ | $\Delta U_2$<br>по<br>упр.<br>ф-ле | $\Delta U_2$<br>по<br>точ.<br>ф-ле | $U_2$<br>по<br>упр.<br>ф-ле | $U_2$<br>по<br>точ.<br>ф. |
|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|-------------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|-----------------------------|---------------------------|
|                                                                   | 0                           | 0                           | 0                                         | 0                                         | 0                                         | 0                                         | 0                                  | 0                                  | 3150                        | 3150                      |
| 0.25                                                              | 7,9                         | 42,7                        | 5,585                                     | 30,17                                     | 30,17                                     | 5,585                                     | 35,76                              | 48,05                              | 3114                        | 3102                      |
| 0.5                                                               | 15,8                        | 85,4                        | 11,17                                     | 60,34                                     | 60,34                                     | 11,17                                     | 71,51                              | 96,10                              | 3079                        | 3054                      |
| 0.75                                                              | 23,7                        | 128,0                       | 16,78                                     | 90,51                                     | 90,51                                     | 16,78                                     | 107,29                             | 144,16                             | 3042                        | 3006                      |
| 1.0                                                               | 31,6                        | 170,7                       | 22,34                                     | 120,68                                    | 120,68                                    | 22,34                                     | 143,02                             | 192,17                             | 3007                        | 2958                      |
| 1.25                                                              | 39,5                        | 213,4                       | 27,93                                     | 150,85                                    | 150,85                                    | 27,93                                     | 178,78                             | 239,46                             | 2971                        | 2911                      |

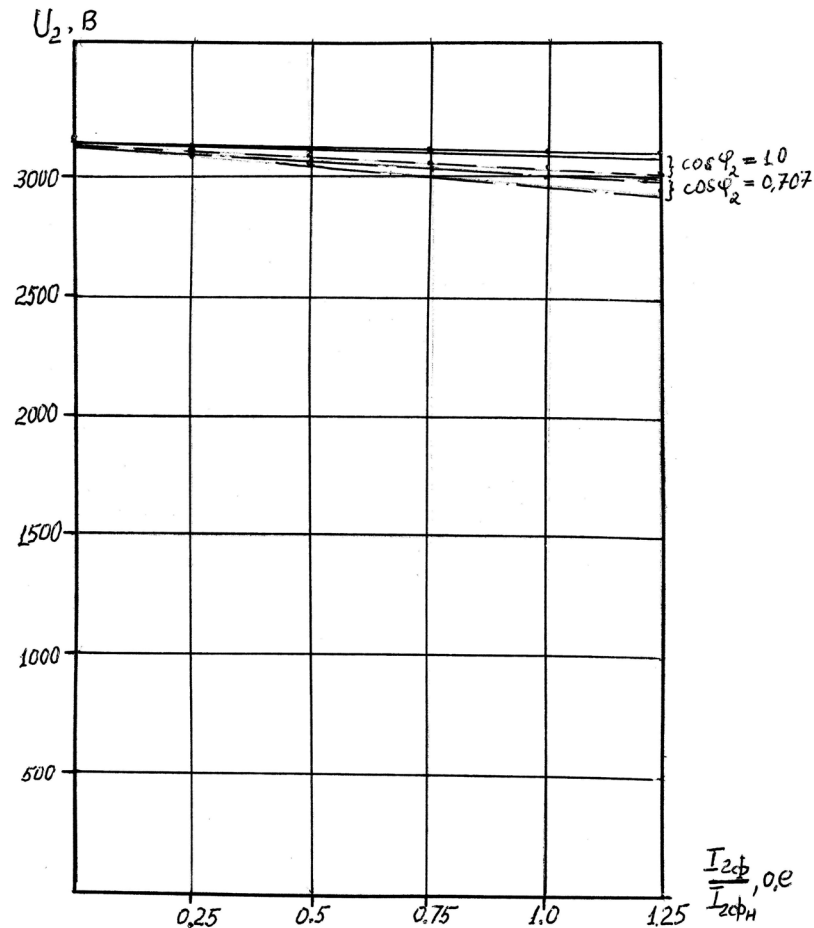


Рисунок 3.7 - Внешние характеристики трансформатора

**Задача 3.4.** Рассчитать и построить зависимость к.п.д. трансформатора от активной вторичной мощности при:  $\cos\varphi_2 = 1$  (активная нагрузка) и при  $\cos\varphi_2 = 0,707$  (активно - индуктивная нагрузка) Определить долевое значение нагрузки, соответствующее максимальному КПД.

#### Характеристика КПД трансформатора

Для построения расчетной зависимости  $\eta = f(P_2)$  необходимо задаться рядом значений  $P_2$  от 0 до номинальной мощности (рис. 3.8) и для каждого значения вычислить КПД по формуле

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + K_n^2 P_K}{K_n S_n \cos\varphi_2 + P_0 + K_n P_K},$$

где  $K_n = \frac{S_2}{S_n}$  - коэффициент нагрузки.

Результаты вычислений при  $\cos \varphi_2 = \text{const}$  сводим в таблицы Б1, Б2

Характеристика КПД при  $\cos \varphi_2 = 1$

Таблица Б1

| $K_n = \frac{S_2}{S_n}$ | $\frac{P_2}{K_n S_n} = \cos \varphi_2$ | $K_n^2 P_k$ | $K_n S_n \cos \varphi_2 + P_0 + K_n^2 P_k$ | $\frac{P_0 + K_n^2 P_k}{K_n^2 P_k}$ | $\frac{P_0 + K_n^2 P_k}{K_n S_n \cos \varphi_2 + P_0 + K_n^2 P_k}$ | $\eta$ |
|-------------------------|----------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------|
| 0                       | 0                                      | 0           | 3,9                                        | 3,9                                 | 1                                                                  | 0      |
| 0.25                    | 625                                    | 1,56        | 630,5                                      | 5,46                                | 0,0087                                                             | 0,9913 |
| 0.5                     | 1250                                   | 6,25        | 1260,2                                     | 10,15                               | 0,0081                                                             | 0,9919 |
| 0.75                    | 1875                                   | 14,06       | 1892,6                                     | 17,96                               | 0,0095                                                             | 0,9905 |
| 1.0                     | 2500                                   | 25          | 2528,9                                     | 28,9                                | 0,0114                                                             | 0,9886 |
| 1.25                    | 3125                                   | 31,25       | 3160,2                                     | 35,15                               | 0,0111                                                             | 0,9889 |

Характеристика КПД при  $\cos \varphi_2 = 0,707$

Таблица Б2

| $K_n = \frac{S_2}{S_n}$ | $\frac{P_2}{K_n S_n} = \cos \varphi_2$ | $K_n^2 P_k$ | $K_n S_n \cos \varphi_2 + P_0 + K_n^2 P_k$ | $\frac{P_0 + K_n^2 P_k}{K_n^2 P_k}$ | $\frac{P_0 + K_n^2 P_k}{K_n S_n \cos \varphi_2 + P_0 + K_n^2 P_k}$ | $\eta$ |
|-------------------------|----------------------------------------|-------------|--------------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|--------|
| 0                       | 0                                      | 0           | 3,9                                        | 3,9                                 | 1                                                                  | 0      |
| 0.25                    | 442                                    | 1,56        | 447,5                                      | 5,46                                | 0,012                                                              | 0,988  |
| 0.5                     | 884                                    | 6,25        | 894,2                                      | 10,15                               | 0,011                                                              | 0,989  |
| 0.75                    | 1326                                   | 14,06       | 1344,0                                     | 17,96                               | 0,013                                                              | 0,987  |
| 1.0                     | 1768                                   | 25          | 1797                                       | 28,9                                | 0,015                                                              | 0,985  |
| 1.25                    | 2209                                   | 31,25       | 2244                                       | 35,15                               | 0,016                                                              | 0,984  |

Долевое (относительное) значение нагрузки, соответствующее максимальному значению КПД определяется из выражений

$$P_0 = K_n^2 P_k; \quad K_n = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}} = \sqrt{\frac{3900}{25000}} \approx 0,4.$$

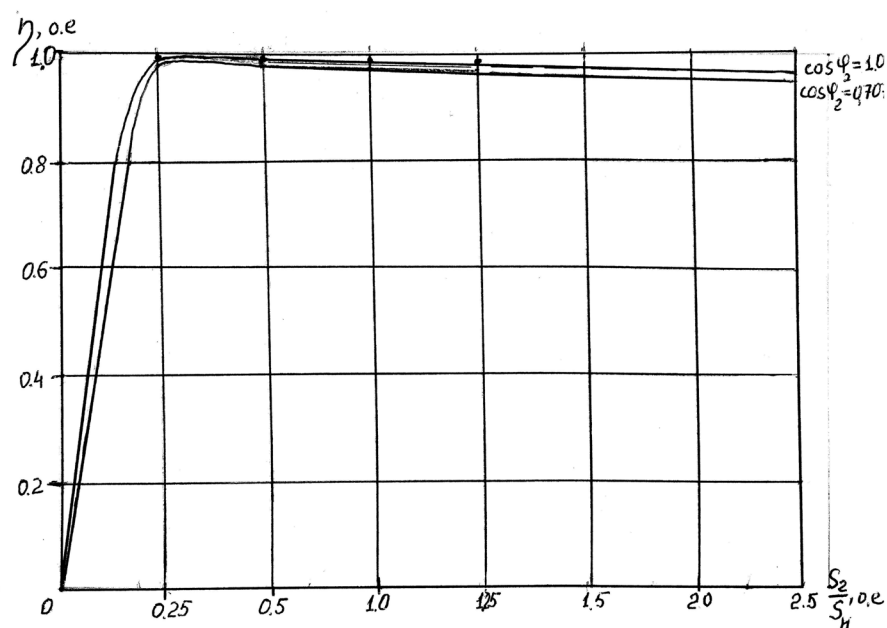


Рисунок 3.8 - Характеристики КПД трансформатора

## Выводы по работе

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В настоящем учебно-методическом пособии по самостоятельной работе студентов изложены принципы и методики расчета эксплуатационных характеристик, параметров и показателей машин постоянного тока и трансформаторов для судового электропривода в статических режимах работы.

Приведенные в пособии примеры расчетов при решении задач на практических занятиях дают возможность целенаправленно выполнять студентам требования, содержащиеся в разделах рабочей программы дисциплины, относящихся к судовым машинам постоянного тока и трансформаторам.

Знания, умения, навыки и приобретенные ими общепрофессиональные и профессиональные компетенции могут быть применены в их трудовой деятельности при решении следующих вопросов:

- поддержания необходимых условий эксплуатации судовых машин постоянного тока и трансформаторов;
- оперативного диагностирования и мониторинга в процессе их эксплуатации по состоянию;
- прогнозирования режимов работы в составе электропривода постоянного тока;
- оценки, анализа и принятия решений в случаях возникновения нештатных ситуаций в процессе эксплуатации;
- анализа характеристик и свойств судовых машин постоянного тока и трансформаторов в послеремонтный период.

При этом необходимо учитывать, что высшее техническое образование судового инженера - электромеханика требует нового подхода к изучению курса электрических машин, который интегрирует знания фундаментальных, общенаучных и общепрофессиональных дисциплин и, наряду с этим, дает практические навыки для будущей трудовой деятельности.

Изучение материалов данного пособия должно сопровождаться пониманием того, что достижения науки и техники, обусловленные ускорением научно-технического прогресса, способствуют совершенствованию также и электрооборудования морского транспорта. В первую очередь это относится к судовым электрическим машинам постоянного тока и трансформаторам, составляющих основу различных общесудовых электроприводов и применяющихся в судовых системах автоматики.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы: учеб. для студ. вузов/ А. И. Вольдек, В. В. Попов. - М. и др.: Питер, 2008. - 320 с.
2. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. Ч.1. – М: Энергия, 1972.
3. Иванов - Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980.
4. Гольдберг О.Д. Электромеханика: учебник для вузов /О.Д. Гольдберг, С.П. Хелемская – М.: Academia, 2007. – 504 с.
5. Гольдберг О.Д. Проектирование электрических машин/О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. Под ред. Гольдберга О.Д. – М.: Высш. шк., 2001.– 431с.
6. Беспалов В.Я. Электрические машины/ В.Я. Беспалов, Н.Ф. Котеленец – М.: Издательский центр Академия, 2006. – 320 с.
7. Копылов, И. П. Электрические машины: Учебник для вузов / под ред. И. П. Копылова. — 2-е изд., перераб. и доп. — М. : Издательство Юрайт, 2012. — 675 с.
8. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин: учебник для вузов / И. П. Копылов. — 4-е изд., перераб. и доп. — Москва : Издательство Юрайт, 2019. — 828 с. — (Высшее образование)
9. Мезин Е.К. Судовые электрические машины: Учебник/ Е.К. Мезин. – Л.: Судостроение, 1985. – 320 с.
10. ГОСТ Р 52002-2003. Электротехника. Термины и определения основных понятий. – Введ. 2003-07-01. М. – М.: Госстандарт России: Издательство стандартов, 2003. – 27 с.
11. ГОСТ Р 52776-2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики – Введ. 2008-01-01. М. – М.: Госстандарт России: Издательство стандартов, 2003. – 27 с.

## П1. ПРИМЕР СОСТАВЛЕНИЯ ТЕЗАУРУСА ПО ТЕМЕ «ОБМОТКИ МАШИН ПОСТОЯННОГО ТОКА»

**Обмотка** – медные проводники, расположенные в пазах статора и (или) ротора машины переменного тока. Обмотки, расположенные в магнитопроводе предназначены для создания магнитного потока. При этом в случае работы машины в режиме генератора в обмотке индуцируется ЭДС, а в случае работы в режиме двигателя посредством обмотки создается электромагнитный вращающий момент.

По конструктивному исполнению различают катушечные и стержневые обмотки, одно- и двухслойные, с диаметральным и укороченным шагом, с одинаковой и разной шириной катушек. Существует также классификация обмоток по способу выполнения лобовых частей (концентрические, вразвалку шаблонные)

**Катушка (секция)** – часть обмотки электрической машины, выполненная из одного или нескольких проводов и имеющая прямоугольную или близкую к ней форму. Как правило, катушка образована из одного или нескольких последовательно соединенных витков. Значительно реже используется параллельное соединение витков. Каждая катушка состоит из активных (прямая и обратная стороны), расположенных в пазах магнитопровода и лобовых частей. В стержневых обмотках лобовые части называются соответственно передней и задней перемычками. Если смотреть на катушку со стороны ее выводов, то левая сторона является прямой, а правая – обратной стороной. Начало и конец катушки определяются направлением ее намотки (право- или левоходовая).

**Распределенная обмотка** – обмотка электрической машины, распределенная по окружности якоря и уложенная в пазы. В коллекторных машинах постоянного тока она состоит из отдельных катушек (секций) или катушечных групп.

**Обмотка ручного (неавтоматизированного) изготовления** – обмотка якоря машины постоянного тока, секции (катушки) которой укладываются в полузакрытые пазы вручную.

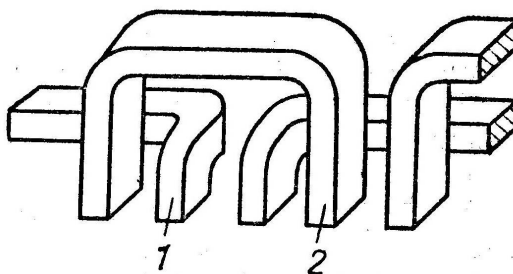


Рисунок П.1 – Обмотка ручного изготовления  
1,2 – нижняя и верхняя секции обмотки

Обычно обмотка выполняется из жесткого медного провода с изоляционным покрытием из хлопка, электротехнической бумаги, асбеста или других жаропрочных материалов. Секции формируются вручную без каких-либо приспособлений. Такие обмотки выполняются двух- и трехплоскостными в лобовых частях.

Как правило, обмотки ручного изготовления обладают высокой механической прочностью и надежностью. При использовании провода с полистирольной изоляцией данный способ может быть применен и для изготовления насыпных обмоток. Крупные электрические машины с обмотками неавтоматизированного изготовления отличаются высокой ремонтопригодностью. Для повышения коэффициента заполнения по меди рекомендуется использовать медный провод с тонким слоем изоляции.

**Прошивная (протяжная) обмотка** – обмотка электрических машин, витки которой один за другим протягиваются в полузакрытые пазы шихтованных статора или ротора.

Для намотки используются такие приспособления, как формовочный шаблон, направляющие и металлические иглы. Пазовая изоляция образована гильзой из электроизоляционного материала, внутри нее выполнены сквозные отверстия, число которых соответствует числу витков катушки обмотки. Лобовые части такой обмотки формируются с помощью специального шаблона. Концы проводников, пропущенных через отверстия указанной гильзы, обрезаются, зачищаются от изоляции и залуживаются. Для облегчения

протягивания проводов через отверстия гильзы используется материал, уменьшающий трение, например тальк. Протяжка проводов через отверстия гильзы осуществляется автоматически с помощью специального механизма, одновременно производится формовка секции обмотки. По такому же принципу формируется и вся обмотка. При серийном изготовлении двигателей с прошивной обмоткой ее намотка практически полностью автоматизирована.

При намотке одной секции между ее витками устанавливается дополнительный шаблон, который удаляется после намотки секции. Для снижения общего количества соединений используются право- и левоходовая намотки. После намотки обмотка подключается к питающей сети, подвергается испытанию повышенным напряжением, а затем пропитывается электроизоляционным лаком и проходит сушку. Обычно прошивные обмотки отличаются высокой электрической и механической прочностью, хотя и сложны в изготовлении. Они используются в тех случаях, когда с целью улучшения электромагнитных показателей машины или предотвращения повреждений обмоток от действия электродинамических усилий используются полузакрытые или закрытые пазы.

**Двухслойная обмотка** – обмотка якоря электрической машины постоянного тока, в каждом пазу которой расположены по две катушечные группы.

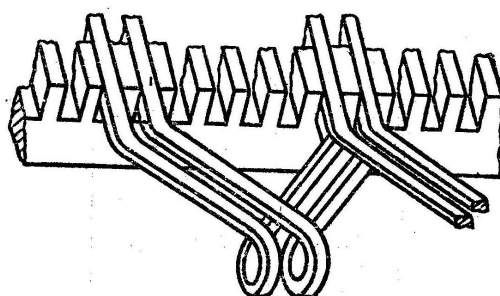


Рисунок П.2 - Двухслойная обмотка барабанного якоря машины постоянного тока

Укладываемые в паз машины катушки располагаются своими сторонами друг над другом, причем стороны катушки располагаются одна – в нижнем слое, а другая – в верхнем слое другого паза и имеют противоположное направление. При этом разница в пространственном расположении нижней и верхней катушек обмоток относительно рабочего воздушного зазора частично компенсируется соответствующим формированием лобовых частей обмотки. При использовании провода большого сечения в крупных машинах применяются секции специального профиля. В двухслойной обмотке используется прием укорочения шага с целью улучшения использования машины по меди.

**Барабанная обмотка** – обмотка якоря коллекторных машин постоянного тока, уложенная в пазы шихтованного магнитопровода якоря цилиндрической формы (рис. П.3). Выводы присоединяются к пластинам коллектора и соединены по схеме петлевой или волновой обмотки. Основным принципом барабанной обмотки является то, что при укладке используются обе стороны катушек (секций).

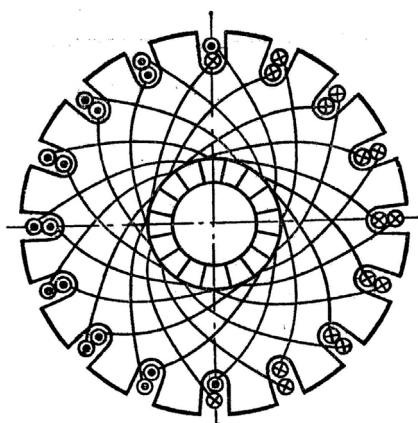


Рисунок П.3 – Барабанная обмотка якоря

**Обмотка якоря коллекторной машины постоянного тока** – барабанная обмотка, выполненная из отдельных секций (катушек), каждая из которых подключена к своей паре коллекторных пластин. Такие обмотки выполняются преимущественно двухслойными из круглого или плоского провода (катушечная или стержневая обмотки).

**Обмотка из шаблонных катушек** – обмотка якоря машин постоянного тока, катушки которых изготавливаются на специальном обмоточном оборудовании из провода большого сечения и укладываются в полуоткрытые пазы пакета якоря (рис. П.4).

Обмотки машин постоянного тока – двухслойные, с открытой секцией петлевые (параллельные) или волновые (последовательные). На практике обмотки из шаблонных катушек применяются в машинах как низкого, так и высокого напряжения.

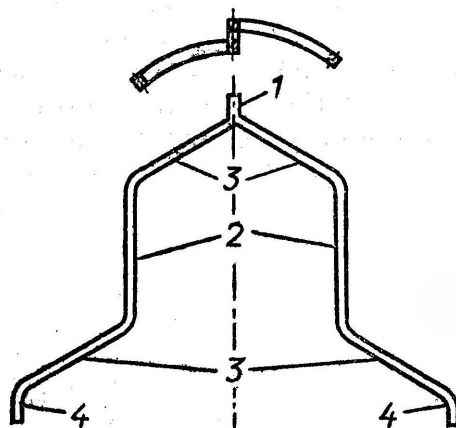


Рисунок П.4 – Обмотка из открытых шаблонных катушек

1 - лобовая часть; 2 – активные стороны; 3 – прямые участки лобовых частей; 4 – вывод катушки

**Петлевая обмотка** характеризуется тем, что ряд катушек, расположенных на данном полюсном делении соединяются между собой последовательно и согласно, образуя катушечную группу. По направлению укладки они делятся на право- и левоходовые. Начало секции присоединяется к одной коллекторной пластине, а конец - к соседней (простая обмотка) или через несколько пластин (сложная обмотка). В двухслойных обмотках слои располагаются в пазу якоря один над другим. В правоходовой петлевой обмотке обратная ветвь секции располагается справа от прямой ветви (рис. П.5а), а в левоходовой – слева от прямой ветви (рис. П.5б).

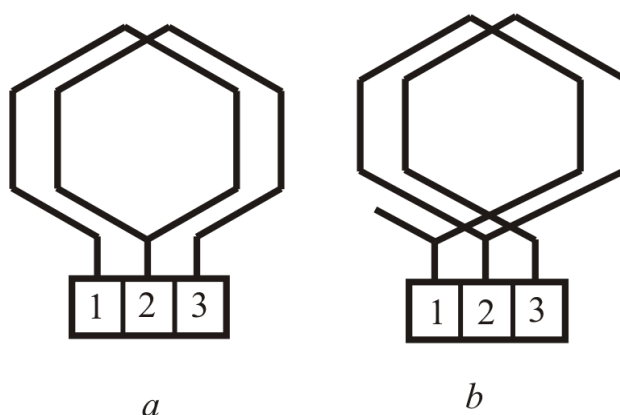


Рисунок П.5 - Петлевая обмотка

*a* - правоходовая не перекрещивающаяся; *b* - левоходовая перекрещивающаяся

Петлевые обмотки называют также параллельными, поскольку они включаются параллельно к щеткам. Они используются в низковольтных машинах с большими токами, и могут быть реализованы при любом количестве пазов. Наибольшее распространение они получили в МПТ малой и средней мощности.

**Параллельные ветви обмотки** - при рассмотрении, например, простой петлевой обмотки видно, что она состоит из двух частей, с последовательным соединением секций, расположенных между щетками разной полярности, называемых *параллельными ветвями обмотки* (рис П.6).

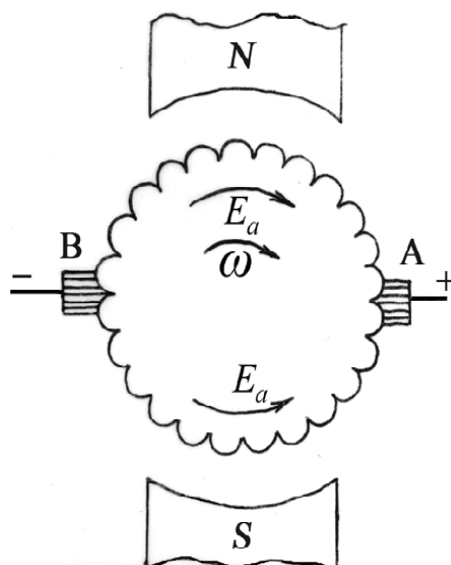


Рисунок П.6 – Образование параллельных ветвей обмотки

В одну ветвь входят секции, начальные стороны которых находятся под северным полюсом, а в другую – под южным.

Таким образом, в простой петлевой обмотке будет столько параллельных ветвей, сколько полюсов индуктора  $2a = 2p$ , причем  $a$  – число пар параллельных ветвей.

ЭДС секций в параллельной ветви складываются. Между щетками в разные моменты времени находятся различные секции, т.к. обмотка с коллектором при вращении непрерывно перемещается относительно щеток.

Секции переходят из одной параллельной ветви в другую, поэтому общее число секций в параллельных ветвях и положение их в магнитном поле практически не меняется.

Сумма ЭДС секций в параллельной ветви не меняется по величине и, следовательно, *на щетках ЭДС неизменна*.

**Обмотка с равномерным шагом** – петлевая обмотка якоря, между сторонами каждой секции которой расположены пазы в равном количестве.

**Электрическая схема обмотки** – обмотку якоря для большей наглядности представляют в виде электрической схемы (рис. П.7), которая выполняется на основании плоскостной или радиальной разверток.

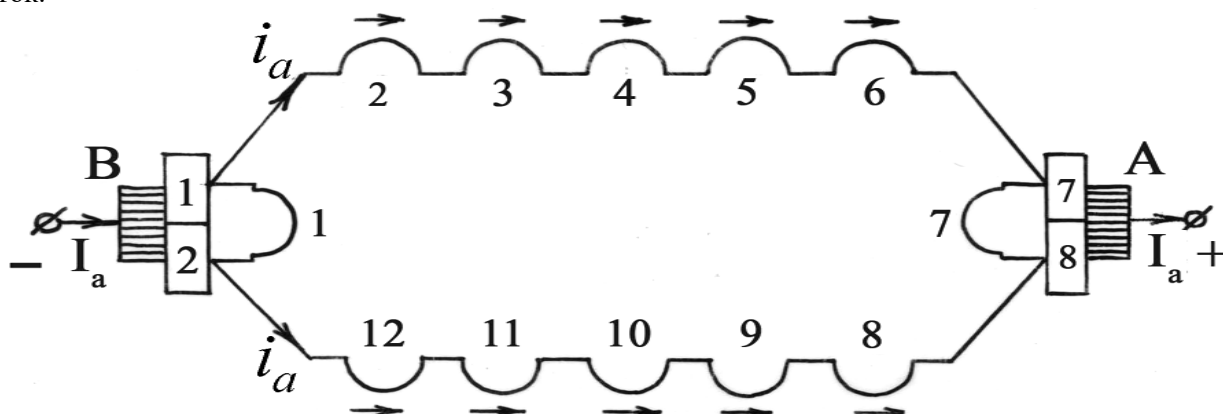


Рисунок П.7 – Эквивалентная электрическая схема простой петлевой обмотки

Для изображения эквивалентной электрической схемы обмотки показывают щетки и имеющие с ними контакт коллекторные пластины. Затем совершают обход секций обмоток, начиная с первой, и изображают их в виде отдельных витков, над которыми показывают направления индуктируемых э.д.с. Из электрической схемы видно, что обмотка (в указанном случае) состоит из 2-х ветвей ( $2a = 2p = 2$ ) по 5 секций в каждой. ЭДС секций в пределах каждой параллельной ветви складывается, ЭДС на зажимах машины равна ЭДС одной параллельной ветви ( $E = E_a$ ).

Ток якоря (ток нагрузки)  $I_a$  равен сумме токов параллельных ветвей ( $i_a$ ), т.е.  $I_a = 2ai_a$ .

Секции 1 и 7 в рассматриваемый момент замкнуты через щетку накоротко и в создании ЭДС параллельных ветвей не участвуют. Это так называемые *коммутируемые секции*.

**Волновая обмотка** – обмотка якоря коллекторной машины постоянного тока, катушки или секции которой через расстояние равное двойному полюсному делению присоединяются к коллекторным пластинам. Различают право- и лево- ходовые двухслойные волновые обмотки (рис. П.8).

В простой волновой обмотке последовательно соединяются секции, находящиеся под разными парами полюсов, при этом расстояние между коллекторными пластинами, к которым присоединяются концы секции, примерно равно *двойному полюсному делению*, т.е. за один обход по якорю укладывается столько секций, сколько пар полюсов имеет машина. При этом конец последней по обходу секции присоединяют к коллекторной пластине, расположенной рядом с исходной слева или справа. В зависимости от этого обмотку называют левоходовой или правоходовой. Обычно применяют *левоходовую* обмотку.

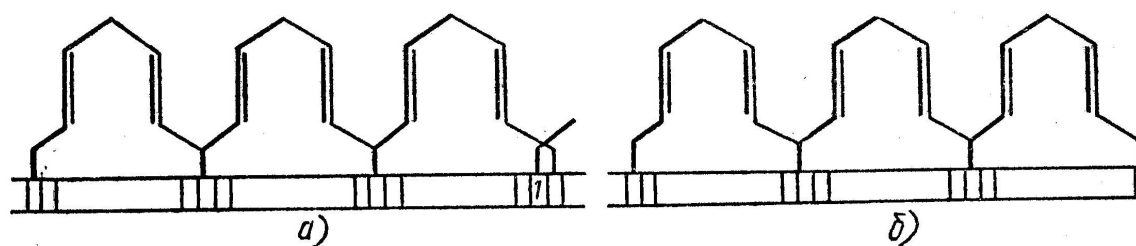


Рисунок П.8 – Волновая обмотка  
а) левоходовая; б) правоходовая

За один обход перемещаются по коллектору на  $p_k$  коллекторных делений, следовательно  $p_k = k \mp 1$ ,  
(–) – для левоходовой обмотки; (+) – для правоходовой обмотки. Порядок построения: 1-й верхний проводник соединяется с 4-м нижним ( $y_1 = 3$ ), затем с 7-м верхним ( $y_2 = 3$ ), с 10 нижним, с 13 верхним и т. д., «шагая» волнами вдоль окружности якоря и коллектора (рис. П.9).

Соединения между секциями припаиваются к ближайшим коллекторным пластинам. Шаг по коллектору при этом получается  $y_k = 6$ . Как видно из схемы, ток в обмотке якоря разветвляется по двум параллельным ветвям: первая ветвь – 12, 5, 11, 4 секции, вторая ветвь – 1, 8, 2, 9 секции.

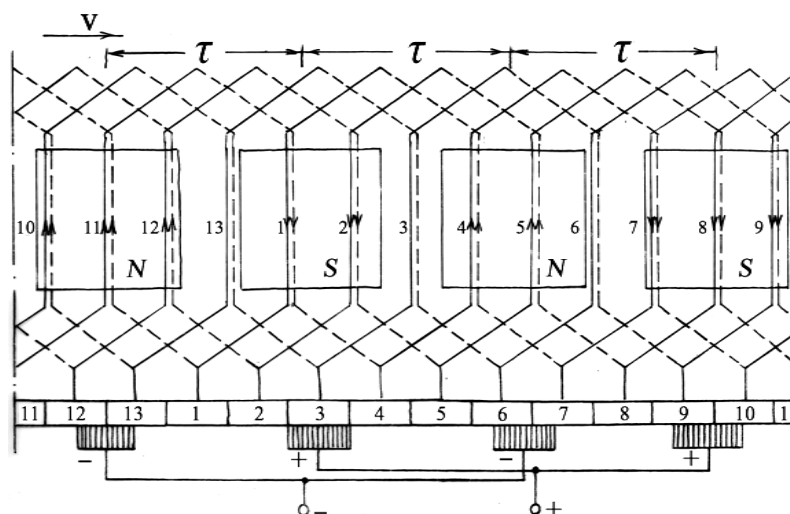


Рисунок П.9 – Плоскостная развертка простой волновой обмотки  
 $2p = 4, S = Z_s = K = 13; W_s = 1; u_s = 1; y_1 = 3; y_2 = 3, y = y_k = 6$

Параллельная ветвь в волновых обмотках образуется из последовательно соединенных секций, лежащих под всеми полюсами машины. Число параллельных ветвей  $2a$  у простой волновой обмотки независимо от числа полюсов машины равно 2, т.е.  $2a = 2$ . Секции 6, 13, 7 и 10, 3 не участвуют в наведении ЭДС, так как они оказываются короткозамкнутыми (коммутируемыми) при данном положении якоря (рис. П,10).

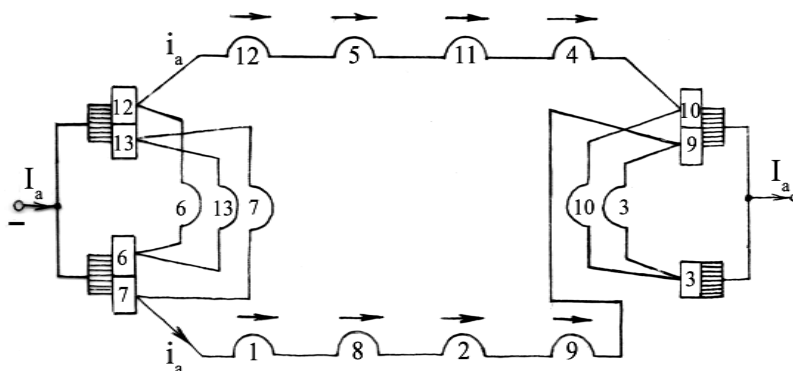


Рисунок П.10 – Эквивалентная электрическая схема простой волновой обмотки

### Библиографический список (пример)

1. ГОСТ Р 52002-2003. Электротехника. Термины и определения основных понятий. – Введ. 2003-07-01. М. – М.: Госстандарт России: Издательство стандартов, 2003. – 27 с.
2. ГОСТ Р 52776-2007. Машины электрические вращающиеся. Номинальные данные и характеристики – Введ. 2008-01-01. М. – М.: Госстандарт России: Издательство стандартов, 2003. – 27 с.
3. Шпаннеберг Х. Электрические машины. 1000 понятий для практиков: Справочник: Пер. с нем. / Х. Шпаннеберг. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 431с.

Составил студент ЭОс-1о-...\_\_\_\_\_

У ч е б н о е и з д а н и е

**Высоцкий Виталий Евгеньевич**

**СУДОВЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА И ТРАНСФОРМАТОРЫ**

*Учебно-методическое пособие*

В авторской редакции

Изд. № 113/2024. Объем 3,5 п.л. Усл. печ. л. 3,25. Уч.-изд. л. 3,43.  
Издательский центр ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»