

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ  
РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

## **РЕМОНТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ. КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

*Рекомендовано Учебно-методическим объединением по аграрному  
техническому образованию в качестве учебно-методического пособия  
для студентов учреждений высшего образования по специальности  
1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям),  
направление специальности 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение  
сельского хозяйства (электроэнергетика)*

Минск  
БГАТУ  
2018

УДК 621.313.333 (07)  
ББК 31.291Я7  
Р38

Составитель:  
старший преподаватель О. Ю. Селицкая

Рецензенты:  
заведующий кафедрой электроснабжения Белорусского национального  
технического университета, кандидат технических наук, доцент *Козловская В. Б.*,  
заместитель директора ГП «Институт энергетики НАН Республики Беларусь»,  
кандидат технических наук, доцент *Шевчик Н. Е.*

Р38 **Ремонт электрооборудования. Курсовое проектирование : учебно-методическое пособие /**  
О. Ю. Селицкая. – Минск : БГАТУ, 2018. – 148 с.  
ISBN 978-985-519-889-6

Содержит методические рекомендации по выполнению курсовой работы по дисциплине «Ремонт электрооборудования», основные требования к оформлению, образец выполнения курсовой работы, приложения, список использованных источников.

Предназначено для студентов учреждений высшего образования и учащихся средних специальных учреждений по специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям) направление специальности 1-74 06 05-01 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (электроэнергетика).

УДК 621.313.333.2 (07)  
ББК 31.261.5Я7

ISBN 978-985-519-889-6

© БГАТУ, 2018

## СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	6
1.1 ЦЕЛЬ, ЗАДАЧИ И ТЕМАТИКА КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	6
1.2 СТРУКТУРА, СОДЕРЖАНИЕ И ОБЪЕМ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	6
1.3 ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	9
2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ .....	13
2.1. ОБМЕР МАГНИТОПРОВОДА ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ .....	13
2.1.1 Площадь полюса в воздушном зазоре .....	15
2.1.2 Площадь полюса в зубцовой зоне .....	16
2.1.3 Площадь поперечного сечения спинки статора .....	18
2.1.4 Площадь паза в свету .....	18
2.2 ОБОСНОВАНИЕ ВЫБОРА ТИПА СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ .....	19
2.3 РАСЧЕТ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ .....	22
2.3.1 Шаг обмотки ( $y'$ ) .....	23
2.3.2 Число катушечных групп .....	23
2.3.3 Число пазов на полюс и фазу $q$ (ширина фазной зоны) .....	24
2.3.4 Число электрических градусов на один паз ( $\alpha$ ) .....	25
2.3.5 Число параллельных ветвей ( $a$ ) .....	26
2.4 ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ .....	28
2.4.1 Построение схем однослойных трехфазных статорных обмоток .....	28
2.4.2 Построение схем двухслойных трехфазных статорных обмоток .....	35
2.4.3 Построение схем трехфазных статорных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу .....	37
2.5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ .....	43
2.5.1 Определение числа витков на одну фазу $W_{\Phi}$ и одну секцию $W_{\text{СЕК}}$ .....	43
2.5.2 Упрощенное определение числа активных проводников в одном пазу $N_{\text{п}54}$ .....	54
2.5.3 Число витков в секции обмотки .....	56
2.6 ВЫБОР ИЗОЛЯЦИИ ПАЗА И ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ .....	56
2.7 ВЫБОР МАРКИ И РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ ОБМОТОЧНОГО ПРОВОДА .....	61
2.7.1 Расчет сечения обмоточного провода .....	63
2.7.2 Расчет размеров секций (длина витка) .....	65
2.8 ОПРЕДЕЛЕНИЕ МАССЫ ОБМОТОЧНОГО ПРОВОДА И СОПРОТИВЛЕНИЯ ОБМОТКИ ОДНОЙ ФАЗЫ ПОСТОЯННОМУ ТОКУ В ПРАКТИЧЕСКИ ХОЛОДНОМ СОСТОЯНИИ .....	67
2.8.1 Расчет массы обмоточного провода .....	67
2.8.2 Электрическое сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии .....	67
2.9 РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНЫХ ДАННЫХ .....	68
2.9.1 Номинальный ток .....	69
2.9.2 Номинальная мощность .....	70

2.10 ПЕРЕРАСЧЕТЫ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ДРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ.....	73
2.10.1 Перерасчет асинхронного электродвигателя на другое напряжение .....	73
2.10.2 Перерасчет асинхронного электродвигателя на другую частоту вращения .....	75
СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ .....	78
ПРИЛОЖЕНИЯ .....	80
ПРИЛОЖЕНИЕ 1. Пример выполнения титульного листа ПЗ курсовой работы .....	81
ПРИЛОЖЕНИЕ 2. Задание на курсовую работу .....	82
ПРИЛОЖЕНИЕ 3. Ведомость комплекта проектной документации .....	84
ПРИЛОЖЕНИЕ 4. Реферат.....	85
ПРИЛОЖЕНИЕ 5. Содержание.....	86
ПРИЛОЖЕНИЕ 6. Оформление проектной документации.....	87
ПРИЛОЖЕНИЕ 7. Данные по электроизоляционным материалам.....	89
ПРИЛОЖЕНИЕ 8. Пример выполнения курсовой работы.....	103

Репозиторий БГАТУ

## ВВЕДЕНИЕ

Для обеспечения надежной работы электрооборудования (далее – ЭО), находящегося на балансе АПК, и, в частности, асинхронных электродвигателей (далее – АД) с короткозамкнутым ротором (как наиболее часто встречаемого вида ЭО на предприятиях агропромышленного комплекса) необходимо своевременно проводить, предусмотренные системой планово-предупредительного ремонта электрооборудования сельскохозяйственных потребителей (далее – система ППРЭСх), основные виды ремонтных работ, таких, как техническое обслуживание (ТО), текущий ремонт (ТР) и капитальный ремонт (КР). Однако в силу различных причин ЭО не всегда вовремя подвергается проверке и проведению профилактических испытаний. Все это приводит к тому, что оно быстро вырабатывает свой ресурс и выходит из строя. Особенно это происходит вследствие старения изоляции, и как результат этого – наличие у АД различных видов повреждений в статорной обмотке (междуфазные, витковые замыкания и замыкания на корпус). Наличие таких повреждений в обмотке не позволяет дальше эксплуатировать машину. Такую обмотку перематывают.

До начала проведения работ по перематке электродвигателя необходимо располагать данными по параметрам перематываемой обмотки, которые можно взять из паспорта электродвигателя, конструкторской документации завода-изготовителя или из специальной технической литературы. Если таких данных нет, то предварительно необходимо «снять» схему обмотки, по которой можно восстановить обмоточные данные. При этом надо учитывать, что поступивший в ремонт электродвигатель мог уже неоднократно подвергаться перематке, во время которой могли быть допущены ошибки, повлекшие за собой отступления от первоначальной схемы.

Для рассмотрения вопросов, связанных с расчетом статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, и определения его основных рабочих параметров предназначено данное учебно-методическое пособие.

Учебно-методическое пособие оформлено в соответствии со стандартами ЕСКД.

# 1 ОБЩИЕ ТРЕБОВАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

## 1.1 Цель, задачи и тематика курсовой работы

*Целью* выполнения курсовой работы является закрепление студентами теоретических знаний по дисциплине «Ремонт электрооборудования» и применение их к решению конкретной практической задачи: определению всех требуемых производством данных для выполнения перемотки статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

*Задачами курсовой работы* являются:

– освоение, углубление, обобщение и проверка теоретических знаний и практических навыков, полученных студентами при изучении дисциплины «Ремонт электрооборудования»;

– изучение методики расчета параметров статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при ремонте, модернизации и выявление взаимосвязи между ними и основными энергетическими характеристиками электрической машины;

– применение практических расчетов при ремонте электрооборудования на реальных машинах;

– формирование умений использовать учебно-методическую, научную и справочную литературу по ремонту и эксплуатации электрооборудования.

Курсовая работа дает возможность установить степень усвоения учебного материала по дисциплине «Ремонт электрооборудования», связанного с расчетами асинхронного электродвигателя при ремонте, проверить способность студентов к самостоятельной, творческой и аналитической работе в решении конкретной практической задачи.

Курсовая работа выполняется *по теме* «Расчет обмотки статора трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при ремонте» по индивидуальным вариантам заданий, разработанным кафедрой.

## 1.2 Структура, содержание и объем курсовой работы

*Структура курсовой работы* должна включать следующие элементы (материалы приведены в порядке их расположения):

– титульный лист (Приложение 1);

– задание на курсовую работу (Приложение 2);

– ведомость комплекта проектной документации (Приложение 3);

- реферат (Приложение 4);
- содержание (Приложение 5, основная надпись форма 2\*);
- введение;
- пояснительная записка (Приложение 6, основная надпись форма 3\*);
- заключение;
- список использованных источников.
- приложения.

Общий объем курсовой работы составляет 30–36 листов машинного или 30–40 листов рукописного текста. Объем графической части состоит из двух листов (ЛИСТ 1 – формат А1 и ЛИСТ 2 – формат А4).

Способ выполнения текстовых материалов - машинописный (основной) с применением выходных печатающих устройств ЭВМ – при этом рекомендуется, набирая текст в текстовом редакторе *MS Word*, использовать шрифты *Times New Roman* размером 14 пт (пунктов) с полуторным интервалом, выравнивание – по ширине, абзацный отступ – 1,25 см.

Графическая часть должна быть выполнена при помощи одного из приведенных графических редакторов AutoCAD LT, AutoCAD 2007–AutoCAD 2011, AutoCAD LT, Компас-2D, *Visual LISP*.

Структурные элементы курсовой работы:

1. *Титульный лист* является первой страницей расчетно-пояснительной записки. Выполняется на бланке установленной формы. На титульном листе рамки не выполняются, штамп основной надписи не приводят.

2. *Задание* является главным руководством, на основании которого выполняется курсовая работа. Задание выполняется на бланке установленного образца, который выдается руководителем курсовой работы. При получении задания свою подпись на нем ставит студент.

3. *Ведомость* комплекта проектной документации является сводным перечнем всех материалов, разработанных при выполнении курсовой работы.

4. *Реферат* – это краткая характеристика выполненной работы, предназначенная для предварительного ознакомления с работой и отражающая ее основное содержание с точки зрения достоинств работы и достижения цели, поставленной в теме.

Текст реферата пишется на стандартном листе, оформленном рамкой. Основную надпись на данном листе не помещают. Номер страницы не проставляют.

5. *Содержание* предназначено для облегчения поиска необходимых материалов при чтении записки, а также для общего ознакомления с работой и представления об объемах всех разделов. Содержание начинается с текстовую часть

расчетно-пояснительной записки. Его размещают сразу после листа реферата с новой страницы и при необходимости продолжают на последующих листах. Слово «Содержание» пишут с прописной буквы посередине страницы. В содержании приводят порядковые номера и наименования разделов, подразделов и пунктов, имеющих наименование, а также приложения с их обозначениями и наименованиями. Указывается номер листа (страницы), на котором размещено начало материала (раздела, подраздела и т. п.). На первой странице содержания приводят основную надпись по форме (Приложение 6, форма 2), соответствующей основной надписи первого листа текстового материала.

6. *Введение* характеризует современное содержание тех вопросов и проблем, которым посвящена курсовая работа. Во введении нужно обосновать необходимость проведения именно этой работы, показать ее место в кругу аналогичных работ, актуальность и новизну разрабатываемой темы, цель проекта и что ожидается получить в результате его выполнения.

7. *Текст пояснительной записки.* Содержание разделов расчетно-пояснительной записки определяется заданием на курсовую работу. Оформление расчетно-пояснительной записки осуществляется в соответствии с п. 1.3.

8. *Заключение* должно отражать основные результаты работы, выводы и предложения.

9. *Список использованных источников.* Составление списка использованных источников является завершением курсовой работы, основой для которого служат записи всех просмотренных и изученных книг и других материалов.

Библиографический указатель использованной при выполнении литературы дается на отдельной странице (страницах) под заголовком «Список использованных источников». Заголовок порядкового номера не имеет.

В список включают только те источники, на которые в тексте ПЗ имеется ссылка. Каждый источник, включенный в список, нумеруют арабскими цифрами с точкой и записывают с новой строки.

10. *Приложения.* Материал, дополняющий текст документа, допускается помещать в приложениях. Приложениями могут быть, например, графический материал, таблицы большого формата, расчеты, описания аппаратуры и приборов, описания алгоритмов и программ задач, решаемых на ЭВМ, и т. д.

Приложения оформляют как продолжение записки на последующих ее листах.

В тексте записки на все приложения должны быть даны ссылки. Приложения располагают в порядке ссылок на них в тексте записки.

Курсовая работа выполняется по разделам в соответствии с технологией модульного обучения, модуль 1 «Расчеты электрооборудования при ремонте».



*Расчетно-пояснительная записка содержит следующие пункты:*

1. Обмер магнитопровода и обработка полученных данных – 2–3 с.
2. Обоснование выбора типа статорной обмотки – 1–2 с.
3. Расчет обмоточных данных – 2–3 с.
4. Принцип построения схемы статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя – 2 с.
5. Расчет параметров обмотки:  $W_{\text{ф}}$ ,  $W_{\text{сек}}$ ,  $N_{\text{п}}$  – 8–10 с.
6. Выбор изоляции паза и лобовых частей обмотки – 3 с.
7. Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода. Расчет размеров секций – 2–3 с.
8. Определение массы обмоточного провода  $G$  (кг); сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии  $R$  (Ом) – 1 с.
9. Расчет номинальных данных – 2 с.
10. Перерасчеты обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей на другие параметры – 3 с.
11. Расчет обмоточных данных для построения развернутой схемы статорной обмотки по заданию на перерасчет – 2 с.
12. Заключение – 1 с.
13. Список использованных источников – 1 с.

*Графическая часть работы включает:*

ЛИСТ 1 (формат А1) – чертеж развернутой схемы двухслойной петлевой статорной обмотки с укороченным шагом по заданию основного расчета на синхронную частоту вращения магнитного поля статора  $n$  ( $\text{мин}^{-1}$ ) с указанием основных обмоточных данных и векторной диаграммы токов для принятого момента времени  $t_1$ .

ЛИСТ 2 (формат А4) – чертеж развернутой схемы статорной обмотки в соответствии с заданием на перерасчет на синхронную частоту вращения магнитного поля статора  $n'$  ( $\text{мин}^{-1}$ ) с указанием основных обмоточных данных и векторной диаграммы токов для принятого момента времени  $t_1$ .

### **1.3 Требования к оформлению курсовой работы**

*Оформление листов пояснительной записки:*

1. Текстовые материалы ПЗ выполняются на листах белой машинописной бумаги, оформленных рамками в соответствии с рисунком 1.1.
2. Основная надпись на листах пояснительной записки выполняется в соответствии с формой 3 (Приложение 6).

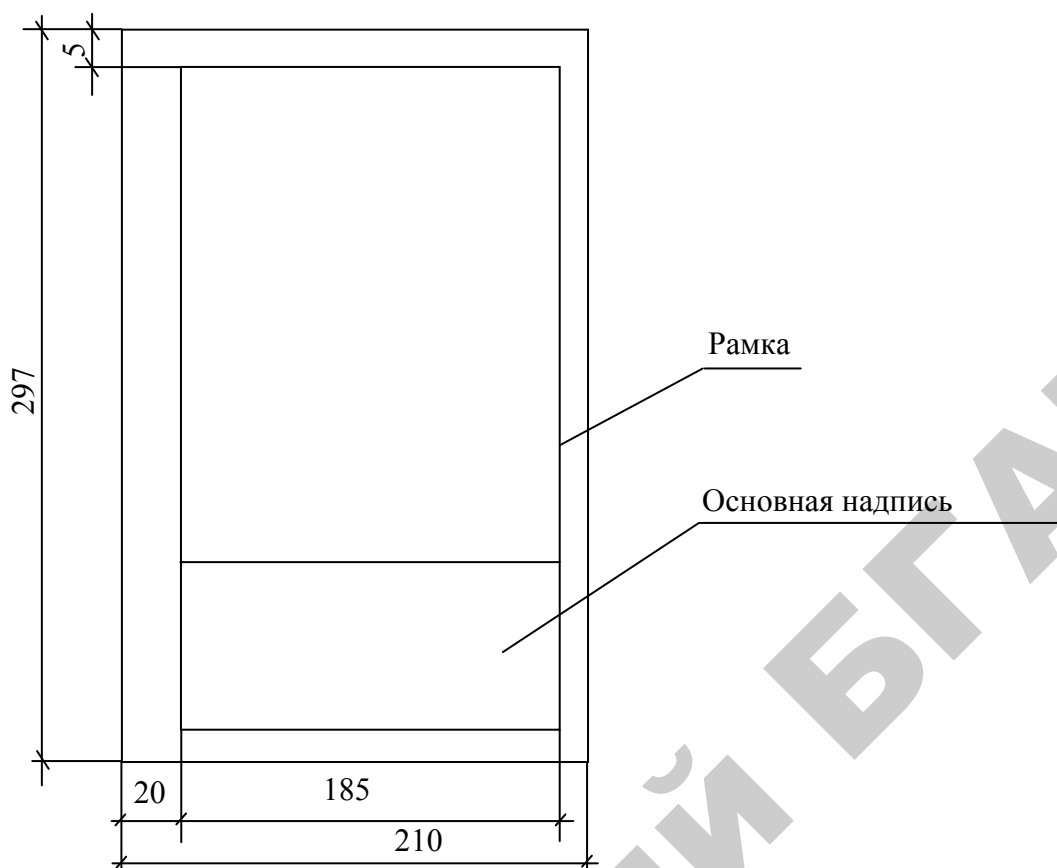


Рисунок 1.1 – Компонка и размеры листа текстовой части ПЗ

3. Листы записки и приложений имеют сквозную нумерацию арабскими цифрами. Титульному листу, заданию на проектирование, реферату номера присваивают, но не проставляют. Номера страниц начинают проставлять с листа «Содержание».

4. Иллюстрации (таблицы, чертежи, схемы и т. п.), расположенные на отдельных листах записки, включают в общую нумерацию страниц. При этом лист, формат которого больше формата А4, учитывают как одну страницу.

*Правила построения текстового материала:*

1. Текстовый материал ПЗ подразделяют на разделы, подразделы, пункты.

Разделам присваивают порядковые номера, которые обозначают арабскими цифрами без точки и записывают с абзацного отступа.

Подразделы должны иметь нумерацию в пределах каждого раздела. Номер подраздела состоит из номера раздела и номера подраздела, разделенных точкой. В конце номера подраздела точка не ставится.

Если раздел или подраздел состоит из одного пункта, то пункт не нумеруется.

2. Разделы и подразделы и при необходимости пункты должны иметь заголовки. Заголовки должны четко и кратко отражать содержание разделов, подразделов, пунктов. Переносы слов в заголовках не допускаются.

Заголовки подразделов (пунктов) не должны повторять содержание заголовков разделов (подразделов).

Заголовок записывается с прописной буквы. Точка в конце не ставится. Заголовки не подчеркиваются. Если заголовок состоит из двух предложений, их разделяют точкой.

3. Каждый раздел ПЗ следует начинать с новой страницы.

*Формулы:*

1. В пояснительной записке математические формулы могут быть расположены внутри текста или отдельными строками. Внутри текста помещают несложные и не дробные формулы. Такие формулы, как правило, не нумеруют.

На отдельных строках приводят более сложные формулы, которые обычно сопровождаются пояснениями примененных символов. При этом выше и ниже формулы необходимо оставлять по одной свободной от записи строке.

2. Формулы, следующие одна за другой и не разделенные текстом, разделяют запятой.

3. Если формула не уместится в одну строку, то делается перенос. Переносить формулу на следующую строку допускается только на знаках выполнения операций: плюс (+), минус (–), умножение (×) или на знаках равенства (=), неравенства (≠), знаках соотношений и т. п.

4. Все формулы, помещенные в тексте ПЗ, нумеруют арабскими цифрами, которые записывают на уровне формулы справа от нее в круглых скобках.

5. Допускается нумерация формул в пределах раздела. В этом случае номер формулы состоит из номера раздела и номера формулы, разделенных точкой, например: (3.1).

Пример. Номинальный ток асинхронного электродвигателя  $I_n$ , А, определяется по формуле

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cos \varphi_n \eta_n}, \quad (1.1)$$

где  $P_n$  – номинальная мощность, кВт;

$U_n$  – номинальное напряжение, кВ;

$\cos \varphi_n$  – коэффициент мощности, о. е.;

$\eta_n$  – КПД электродвигателя, о. е.

*Таблицы:*

1. Название таблицы должно отражать содержание таблицы, быть точным, кратким. Название следует размещать над таблицей после слова «Таблица».

При переносе части таблицы на другие страницы название помещают только над первой частью таблицы.

2. Таблицы, за исключением таблиц приложений, следует нумеровать арабскими цифрами сквозной нумерацией. Допускается нумеровать таблицы в пределах раздела. В этом случае номер таблицы состоит из номера раздела и порядкового номера таблицы, разделенных точкой.

3. На все таблицы должны быть приведены ссылки в тексте. При ссылке необходимо писать слово «таблица» с указанием ее номера.

4. Заголовки граф и строк в таблице следует писать с прописной буквы, а подзаголовки граф – со строчной буквы, если они составляют одно предложение с заголовком, или с прописной буквы, если они имеют самостоятельное значение. В конце заголовков и подзаголовков таблиц точки не ставят.

## 2 МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

### 2.1 Обмер магнитопровода электродвигателя и обработка полученных данных

Магнитопровод электрической машины является незаменимым конструктивным элементом, предназначенным для передачи магнитного потока. Мощность электродвигателя напрямую зависит от габаритов магнитной системы и от величины магнитного потока, проходящего через него. В обмотке, состоящей из трех самостоятельных фаз, уложенных в пазы магнитопровода под углом 120 электрических градусов ( $^{\circ}$  эл.) в пространстве, при подключении к источнику питания будут протекать токи, которые создают вращающийся переменный магнитный поток, пронизывающий магнитную систему, проходя через спинку статора, зубцовую зону, а также воздушный зазор, индуцируя в стержнях ротора ЭДС. Плотности магнитного потока (индукции) на этих участках вследствие разности их геометрических размеров также будут разными. Поэтому важно знать площади участков по магнитной системе, через которые проходит магнитный поток, чтобы при расчете электродвигателя найти оптимальное соотношение величин магнитных нагрузок (чтобы они не выходили за рамки допустимых пределов для данной машины) и в то же время получить на выходе электродвигателя максимальную мощность. Для этого на начальном этапе выполняют предварительный расчет, который заключается в определении четырех площадей:

- полюса в воздушном зазоре ( $Q_{\delta}$ ,  $\text{м}^2$ );
- полюса в зубцовой зоне статора ( $Q_z$ ,  $\text{м}^2$ );
- поперечного сечения спинки статора ( $Q_c$ ,  $\text{м}^2$ );
- паза в статоре ( $Q_{\text{п}}$ ,  $\text{мм}^2$ ).

Первые три из четырех площадей необходимы для расчета магнитных нагрузок ( $B$ , Тл), последняя площадь – для расчета сечения обмоточного провода ( $\Pi_p$ ,  $\text{мм}^2$ ).

Обмер магнитопровода ремонтируемой машины (рисунок 2.1) выполняют при помощи линеек, штангенциркуля, угольников и других приспособлений. При этом необходимо снимать следующие размеры:

- $D$  – внутренний диаметр сердечника статора, мм;
- $D_a$  – внешний диаметр сердечника статора, мм;
- $l$  – полная длина сердечника статора, мм;
- $\delta$  – толщина листов электротехнической стали, мм;

$h$  – полная высота паза (зубца), мм;

$Z_1$  – число пазов (зубцов) статора, шт.

Также устанавливается род изоляции (лак или оксидная пленка) между листами электротехнической стали.

Для определения сечения обмоточного провода, как было указано выше, необходимо знать площадь паза. Причем профиль его может быть самой различной формы (от простой до достаточно сложной). Для асинхронных электродвигателей мощностью до 100 кВт пазы статора имеют в основном овальную (грушевидную), полуовальную и трапецидальную формы (рисунок 2.2). Наиболее технологичным считается овальный паз (рисунок 2.2, *a*), но по величине площади он уступает другим формам. Кроме технологичности, к достоинствам овального и полуовального пазов также можно отнести и то, что у основания таких пазов магнитное сопротивление меньше, что снижает магнитное напряжение зубцового слоя. К достоинству паза, имеющего трапецидальную форму, можно отнести его большую площадь, но изготовление магнитопроводов с трапецидальной формой гораздо сложнее.

При определении площади паза, в зависимости от его конфигурации, для упрощения расчета производят разбивку паза при помощи осевых линий на простые геометрические фигуры, площадь которых определить несложно. Общую площадь паза определяют как сумму площадей этих фигур.

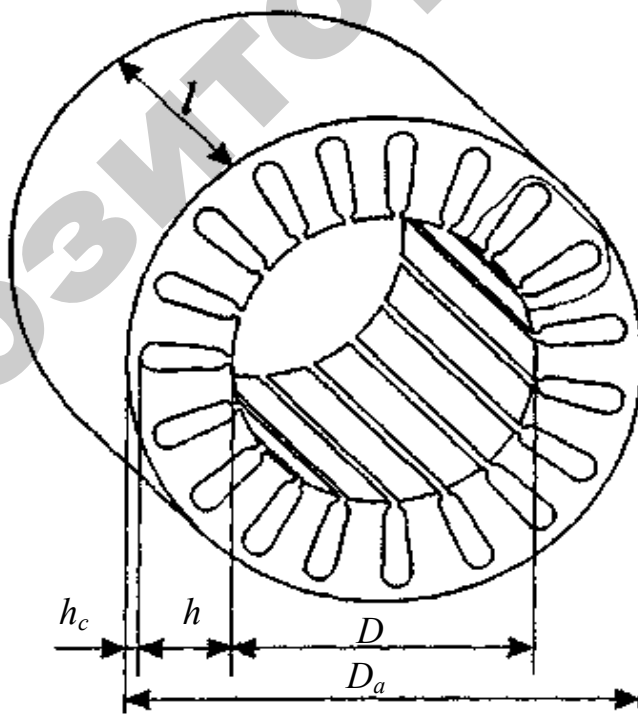


Рисунок 2.1 – Магнитопровод асинхронного двигателя с указанием основных габаритных размеров

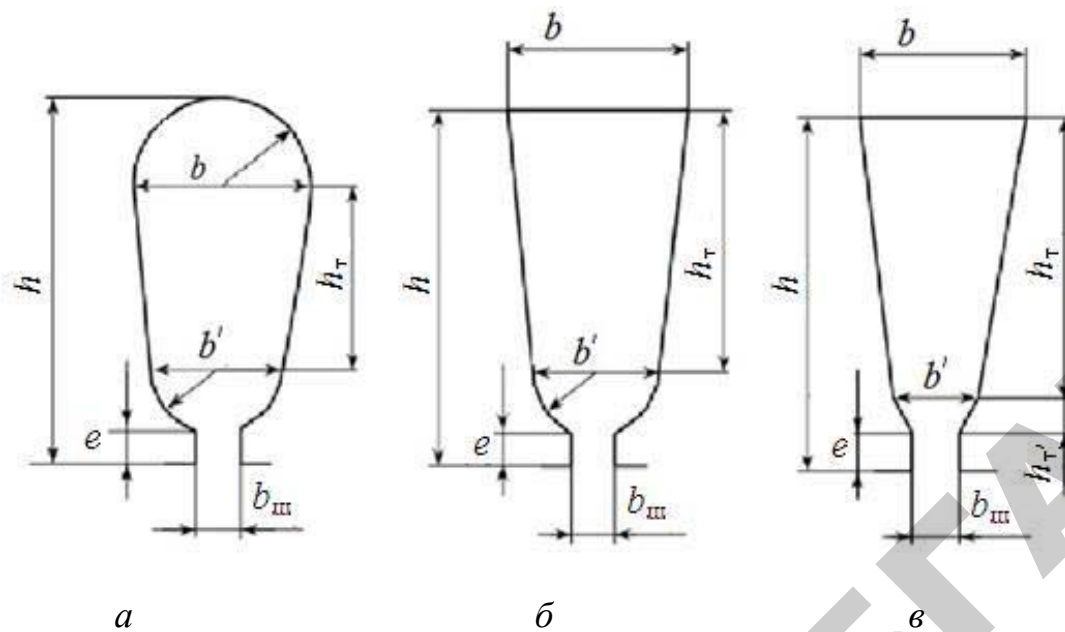


Рисунок 2.2 – Формы пазов статора: а – овальная; б – полуовальная; в – трапецеидальная

Например, овальный паз (рисунок 2.2, а) осевыми линиями разделяется на следующие простые геометрические фигуры: две полуокружности с диаметрами  $b$  и  $b'$ , и трапецию с основаниями  $b$  и  $b'$ .

Для расчета обмотки вместе с размерами магнитопровода трехфазного асинхронного электродвигателя необходимо знать *технические условия заказчика*, в которые входят:

$n_1$  – синхронная частота вращения магнитного поля статора,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$U_\phi$  – фазное напряжение обмотки статора, В;

$f$  – частота тока, Гц;

$Y/\Delta$  – схема соединения фазных обмоток (звезда/треугольник).

### 2.1.1 Площадь полюса в воздушном зазоре

В воздушном зазоре сопротивление магнитному потоку по всей площади равномерное. Исходя из этого, площадь полюса в воздушном зазоре можно определить по выражению:

$$Q_\delta = \tau l_p, \quad (2.1)$$

где  $\tau$  – полюсное деление (ширина полюса в воздушном зазоре), м;

$l_p$  – расчетная длина сердечника статора, м;

$$\tau = \frac{\pi D}{2P}, \quad (2.2)$$

где  $P$  – количество пар полюсов, шт.,

$$P = \frac{60f}{n}. \quad (2.3)$$

Следовательно, полюсное деление статора  $\tau$  – это расстояние между серединами соседних разноименных полюсов, которое можно измерять в единицах длины или пазовых делениях. Пазовое деление – это расстояние по внутренней расточке статора между серединами соседних зубцов.

Расчетная длина сердечника статора, если магнитопровод не имеет дополнительных поперечных каналов на охлаждение, равна полной длине магнитопровода  $l_p = l$ . При наличии дополнительных поперечных каналов на охлаждение, расчетная длина магнитопровода определяется:

$$l_p = l - l_k n_k, \quad (2.4)$$

где  $l$  – полная длина магнитопровода, м;

$l_k$  и  $n_k$  – ширина поперечных каналов (м) и их число соответственно.

### 2.1.2 Площадь полюса в зубцовой зоне

В зубцовой зоне статора магнитный поток протекает только по листам электротехнической стали, так как ее магнитная проницаемость  $\mu$  много больше, чем изоляции (сталь –  $\mu \approx 5-15$  тыс., изоляция –  $\mu \approx 1$ ). Следовательно, длина магнитопровода  $l$  и площадь полюса  $Q_z$  сократятся на площадь, занимаемую изоляцией.

Отсюда  $Q_z$  будет равна произведению площади одного зубца на количество зубцов под полюсом,  $m^2$ :

$$Q_z = Q_{1z} N_z, \quad (2.5)$$

где  $Q_{1z}$  – площадь одного зубца,  $m^2$ ;

$N_z$  – количество зубцов под полюсом, шт.



$$Q_{1z} = l_a b_z, \quad (2.6)$$

где  $l_a$  – активная длина магнитопровода (без изоляции листов), м;  
 $b_z$  – расчетная средняя ширина зубца, м;

$$l_a = K_c l_p, \quad (2.7)$$

где  $K_c$  – коэффициент, учитывающий заполнение пакета магнитопровода сталью, зависящий от рода изоляции и толщины листов стали, таблица 2.1.

Таблица 2.1 – Значение коэффициента заполнения листов сталью (в зависимости от толщины листов стали и рода изоляции)

Толщина листов стали статора $\delta$ , мм	Изоляция	
	Лак	Оксидная пленка
0,35	0,9	0,93
0,5	0,93	0,95

Средняя ширина зуба определяется из выражения:

$$b_z = \frac{1}{3}(2b'_z + b''_z), \quad (2.8)$$

где  $b'_z$  и  $b''_z$  – ширина зуба соответственно в узком и широком местах, м.

Где находится узкое ( $b'_z$ ) и где широкое ( $b''_z$ ) место у профиля зуба (рисунок 2.3) зависит от размеров магнитопровода и формы паза, поэтому вначале находятся размеры по ширине зуба у расточки статора  $b_z^*$ , а затем ширину у его основания  $b_z^{**}$ . Для овальной формы паза определение этих размеров выполняют по выражениям (2.9) и (2.10):

$$b_z^* = \frac{\pi(D + 2e + b')}{z} - b', \quad (2.9)$$

$$b_z^{**} = \frac{\pi[(D + 2h) - b]}{z} - b. \quad (2.10)$$

По полученным значениям величин  $b_z^*$  и  $b_z^{**}$  находятся: ширина зубца в узком месте ( $b'_z$ ) и в широком – ( $b''_z$ ).

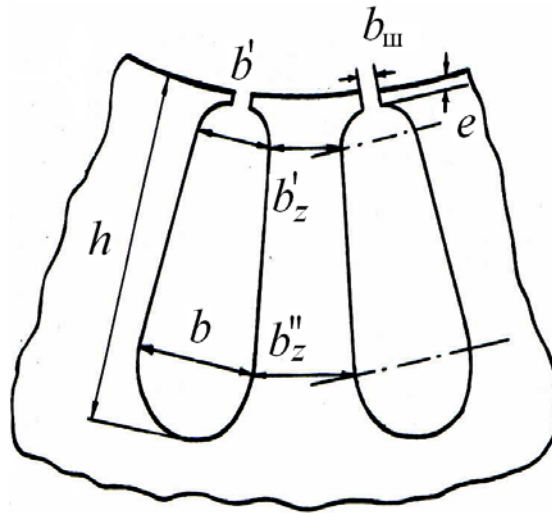


Рисунок 2.3 – Эскиз зубца магнитопровода асинхронного двигателя

Количество зубцов под полюсом определяется из выражения:

$$N_z = \frac{z}{2P}, \text{ шт.} \quad (2.11)$$

### 2.1.3 Площадь поперечного сечения спинки статора

Площадь поперечного сечения спинки статора, перпендикулярная магнитному потоку  $\Phi$ , равна произведению ее высоты  $h_c$  на активную длину магнитопровода  $l_a$  (п. 2.1.2):

$$Q_c = h_c l_a, \quad (2.12)$$

где  $h_c$  – высота спинки статора:

$$h_c = \frac{D_a - (D + 2h)}{2}. \quad (2.13)$$

### 2.1.4 Площадь паза в свету

Площадь паза в свету  $Q_{\Pi}$ , мм<sup>2</sup> необходима для расчета сечения обмоточного провода.

Как было указано ранее, для овальной формы паза (рисунок 2.2, а) при определении площади, паз осевыми линиями разделяется на следующие простые геометрические фигуры: две полуокружности с диаметрами  $b$  и  $b'$ , и трапецию

с основаниями  $b$  и  $b'$ . Полная площадь паза в свету для овальной формы будет определяться по выражению

$$Q_{\pi} = Q_b + Q_m + Q_{b'} = \frac{\pi(b')^2}{8} + \frac{b' + b}{2} h_T + \frac{\pi(b)^2}{8}, \quad (2.14)$$

где  $h_T$  – высота трапеции, мм:

$$h_T = h - e - \frac{b'}{2} - \frac{b}{2}. \quad (2.15)$$

## 2.2 Обоснование выбора типа статорной обмотки

Статорная обмотка трехфазного асинхронного двигателя выполняется из витков обмоточного провода, то есть проводников (медных или алюминиевых), покрытых тонким слоем изоляции с высокой электрической прочностью, которые размещаются в пазах магнитопровода машины для получения вращающегося переменного магнитного поля.

Статорная обмотка трехфазного асинхронного электродвигателя состоит из 3-х абсолютно идентичных фазных обмоток. В электротехнике фазы принято обозначать буквами А, В, С, имеющие обозначение выводов в соответствии с ГОСТ 26772–85 (СТ СЭВ 3170–81)  $U1-U2$  – фаза «А»,  $V1-V2$  – фаза «В»,  $W1-W2$  – фаза «С». Часто встречаются асинхронные электродвигатели, имеющие маркировку по ГОСТ 183–74 (С1-С4) – фаза «А», (С2-С5) – фаза «В», (С3-С6) – фаза «С». Трехфазная система питания представляет собой частный случай многофазных систем электрических цепей переменного тока, в которых действуют созданные общим источником синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые относительно друг друга во времени на определенный фазовый угол. В трехфазной системе этот угол составляет  $\frac{2\pi}{3}$  ( $120^\circ$ ).

Компоновка статорной обмотки представляет собой взаимосвязь следующих элементов: *Виток* → *Секция* → *Фазная катушка (катушечная группа)* → *Фазная обмотка* → *Статорная обмотка трехфазного асинхронного двигателя*.

*Виток* – это проводник, имеющий соответствующую форму, который состоит из 2-х активных сторон (части витка, находящиеся в пазах магнитопровода) и 2-х лобовых частей, соединяющих активные проводники.

*Секция* (от лат. *Section* – резать, резание, часть) – катушка из обмоточного провода, являющаяся частью катушечной группы. Она, как и виток, состоит из 2-х

активных и 2-х лобовых частей. Секция может состоять из одного витка, но в общем случае число витков в ней определяется специальным расчетом.

*Фазную катушку* при  $q > 1$  чаще называют катушечной группой или полюсной группой, так как она чаще всего состоит из 2-х или более последовательно соединенных катушек (секций), которые укладываются в рядом лежащие пазы магнитопровода. Соединенные соответствующим образом (последовательно, параллельно или комбинированно) фазные катушки одной и той же фазы образуют *фазную обмотку*.

*Полюсом* в общем случае называют сечение, через которое магнитный поток переходит из одной среды в другую. Причем если магнитные силовые линии выходят из полюса, его принято называть северным ( $N$ , положительным), если входят – южным ( $S$ , отрицательным).

*Полюсом в асинхронной машине*, так как он в ней является «бегущим» (вращающимся), называют часть пространства расточки статора, охватывающего рядом лежащие пазы магнитопровода с одинаковым направлением тока в активных проводниках (независимо от фазности катушек).

В создании каждого полюса принимают участие все три фазы тока, следовательно, в каждом полюсе должны быть их три фазные катушки.

При выборе типа обмотки необходимо учитывать следующие факторы:

- номинальные параметры машины (мощность и напряжение и др.);
- форму паза магнитопровода, подлежащего намотке;
- экономическую целесообразность;
- расход обмоточного провода (должен быть минимальным);
- достоинства и недостатки принятых к сравнению обмоток;
- техническую возможность выполнения выбранного типа обмотки в конкретных условиях.

Схемы статорных обмоток трехфазных электрических машин разделяют по:

- *числу активных сторон секций в пазу*: на однослойные (у которых активная сторона одной и той же катушки занимает весь паз) и двухслойные (активная сторона занимает половину паза);
- *размеру шага*: на обмотки с полным (диаметральным) шагом (при  $y = y' = \tau$ ) и с укороченным шагом (при  $y < y'$ );
- *частоте вращения магнитного поля статора*: на односкоростные и многоскоростные;
- *числу секций в катушечных группах (фазных катушек)*: на обмотки с одинаковым числом секций в группе ( $q$  равно целому числу) и разным ( $q$  равно дробному числу);

**По способу выполнения (укладки)** обмотки разделяют:

- на шаблонно-рассыпные (или всыпные), они же называются и обмотками с мягкими секциями. У таких обмоток секции укладываются по одному проводнику через прорезь (шлиц) полузакрытого паза. Применяются для машин малой и средней мощности с  $U_n$  до 500 В;

- протяжные, выполняются протяжкой провода через пазы с торца. Используются для машин напряжением до 10 000 В при закрытых или полузакрытых пазах. Способ укладки обмоток трудоемок. В настоящее время используются в основном при частичном ремонте обмоток;

- обмотки с жесткими секциями. Готовые, изолированные секции, несущие на активных частях пазовую изоляцию, укладываются в открытые пазы. Используются для машин средней и большой мощности с номинальным напряжением до 10 000 В (и даже более).

**По способу размещения секций катушечных групп** в расточке статора, а также размещения лобовых частей подразделяются:

- на концентрические, с размещением секций (катушек) одна внутри другой и расположением лобовых частей в двух или трех плоскостях. Такие обмотки выполняются обычно вразвалку;

- шаблонные, с одинаковыми секциями катушечных групп. Могут выполняться и простыми, и вразвалку. Если в шаблонной однослойной обмотке вразвалку выполнить не по полугруппам, а по отдельным катушкам, получим схему цепной обмотки.

**Однослойные обмотки** выполняются главным образом петлевыми, простыми шаблонными, шаблонными «вразвалку», цепными, концентрическими.

Основные *достоинства однослойной обмотки* по сравнению с двухслойной:

- 1) отсутствие межслоевой изоляции, что повышает коэффициент заполнения паза, а, следовательно, ток и мощность двигателя;

- 2) простота изготовления;

- 3) большая возможность применения автоматизации при укладке обмоток.

Основные *недостатки однослойной обмотки*:

- 1) повышенный расход проводникового материала;

- 2) сложность укорочения шага, а, следовательно, компенсации высших гармоник магнитного потока;

- 3) ограниченные возможности построения обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу;

- 4) более трудоемкое изготовление и монтаж катушек для крупных электродвигателей высокого напряжения.

**Двухслойные обмотки** в основном выполняются с одинаковыми секциями, петлевые, цепные, реже делаются концентрические.

Основные *достоинства двухслойной обмотки* по сравнению с однослойной:

1) возможность любого укорочения шага, что позволяет: снизить расход обмоточного провода за счет уменьшения длины лобовой части секций; уменьшить высшие гармонические составляющие магнитного потока, то есть снизить потери в магнитопроводе двигателя;

2) простота технологического процесса изготовления катушек (многие операции можно механизировать);

3) возможность выполнения обмотки почти с любой дробностью  $q$ , что обеспечивает изготовление обмотки при ремонте асинхронных двигателей с изменением частоты вращения ротора. Кроме того, это является одним из способов приближения формы поля к синусоиде;

4) возможность образования большего числа параллельных ветвей.

Основные *недостатки двухслойной обмотки*:

1) меньший коэффициент заполнения пазов (вследствие наличия межслоевой изоляции);

2) некоторая сложность при укладке последних секций обмотки;

3) необходимость поднимать целый шаг обмотки при повреждении нижней стороны секции.

По приведенным соображениям в настоящее время при ремонте машин переменного тока двухслойные обмотки получили наибольшее применение. Они дают возможность (особенно при укороченном шаге) сократить до минимума по сравнению с другими типами обмоток расход обмоточного провода на единицу мощности асинхронного электродвигателя. Обладают такими существенными достоинствами, как простота технологии изготовления, высокая степень компенсации гармонических составляющих магнитного потока и др. К сказанному следует добавить, что двухслойные обмотки без укорочения шага практически не делаются.

### 2.3 Расчет обмоточных данных

Любой тип обмотки трехфазной машины переменного тока характеризуется следующими обмоточными данными:

$y'$  – шаг обмотки;

$N$  – число катушечных групп;

$q$  – число пазов на полюс и фазу (ширина фазной зоны);

$\alpha$  – число электрических градусов, приходящихся на один паз;

$a$  – число параллельных ветвей.

### 2.3.1 Шаг обмотки ( $y'$ )

Под шагом обмотки  $y'$  понимается расстояние, выраженное в зубцах (или пазах), между активными сторонами одной и той же секции, определяемое по формуле

$$y' = \frac{z}{2P} \pm \varepsilon, \quad (2.16)$$

где  $P$  – число пар полюсов;

$\varepsilon$  – произвольное число ( $0 < \varepsilon < 1$ ), доводящее расчетный шаг ( $y'$ ) до целого значения.

Шаг, равный полюсному делению  $\tau$ , называется *полным или диаметральной*, если же он меньше размера полюсного деления ( $y < \tau$ ), то его называют *укороченным*.

На практике принято шаг определять в пазах, поэтому при раскладке вторая сторона секции ложится в паз  $y' + 1$ .

### 2.3.2 Число катушечных групп

Так как в витке ток в активных проводниках направлен встречно, каждая фазная катушка обмотки участвует в создании пары полюсов. Следовательно, между числом катушечных групп и числом пар полюсов имеется жесткая связь, которая определяется соотношением

$$N_{1\phi} = P, \quad (2.17)$$

где  $N_{1\phi}$  – число катушечных групп в одной фазе обмотки, шт.

Такая взаимосвязь характерна для однослойных обмоток, так как ранее было указано, что в однослойных обмотках активные проводники, принадлежащие одной из активных сторон секции (катушки), занимают всю полость паза, поэтому начала и концы катушечных групп, образующие фазную обмотку, будут смещены на расстояние, равное одной паре полюсов, а число катушечных групп внутри-фазно равно  $P$ , то есть

$$N_{1\phi}^{(1)} = P, \quad (2.18)$$

где  $N_{1\phi}^{(1)}$  – число катушечных групп в одной фазе однослойной обмотки, шт.

Так как каждую пару полюсов создают все три фазы переменного тока, следовательно, число катушечных групп обмотки асинхронного двигателя естественно увеличивается в  $m$  раз. И для однослойных обмоток это будет определяться по выражению

$$N_{3\Phi}^{(1)} = Pm, \quad (2.19)$$

где  $m$  – число фаз.

В двухслойных обмотках число катушечных групп механически увеличивается в два раза (фазные катушки однослойной обмотки по всем секциям разделяют пополам), поэтому в каждой секции число витков будет в два раза меньше, число же катушечных групп – в два раза больше, следовательно:

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2P, \quad (2.20)$$

где  $N_{1\Phi}^{(2)}$  – число катушечных групп в одной фазе двухслойной обмотки, шт.

Для трех фаз число катушечных групп будет определяться по формуле

$$N_{3\Phi}^{(2)} = 2Pm. \quad (2.21)$$

### 2.3.3 Число пазов на полюс и фазу $q$ (ширина фазной зоны)

Ширина фазной зоны у большинства современных электродвигателей соответствует  $60^\circ$  эл., то есть

$$q = \frac{\tau}{3}. \quad (2.22)$$

В создании каждого полюса необходимо участие всех трех фаз. Чтобы определить, сколько пазов от каждой фазы приходится на один полюс, используем выражение

$$q = \frac{z}{2Pm}. \quad (2.23)$$



Обычно в электрических машинах переменного тока величина  $q$  варьируется в пределах 2–6 (сосредоточенные обмотки при  $q = 1$  практически не применяют), иногда она может быть дробной\*. Также число пазов на полюс и фазу определяет число катушек – секций, образующих полюсную группу.

\*Примечание: методика построения обмоток с нецелым числом  $q$  будет рассмотрена ниже.

### 2.3.4 Число электрических градусов на один паз ( $\alpha$ )

В расточке статора асинхронного двигателя распределение магнитного потока под одной парой полюсов подчиняется синусоидальному закону, то есть по краям полюсов магнитных силовых линий нет, при приближении к центру число их плавно возрастает и в центре полюса достигает максимума (рисунок 2.4, а).

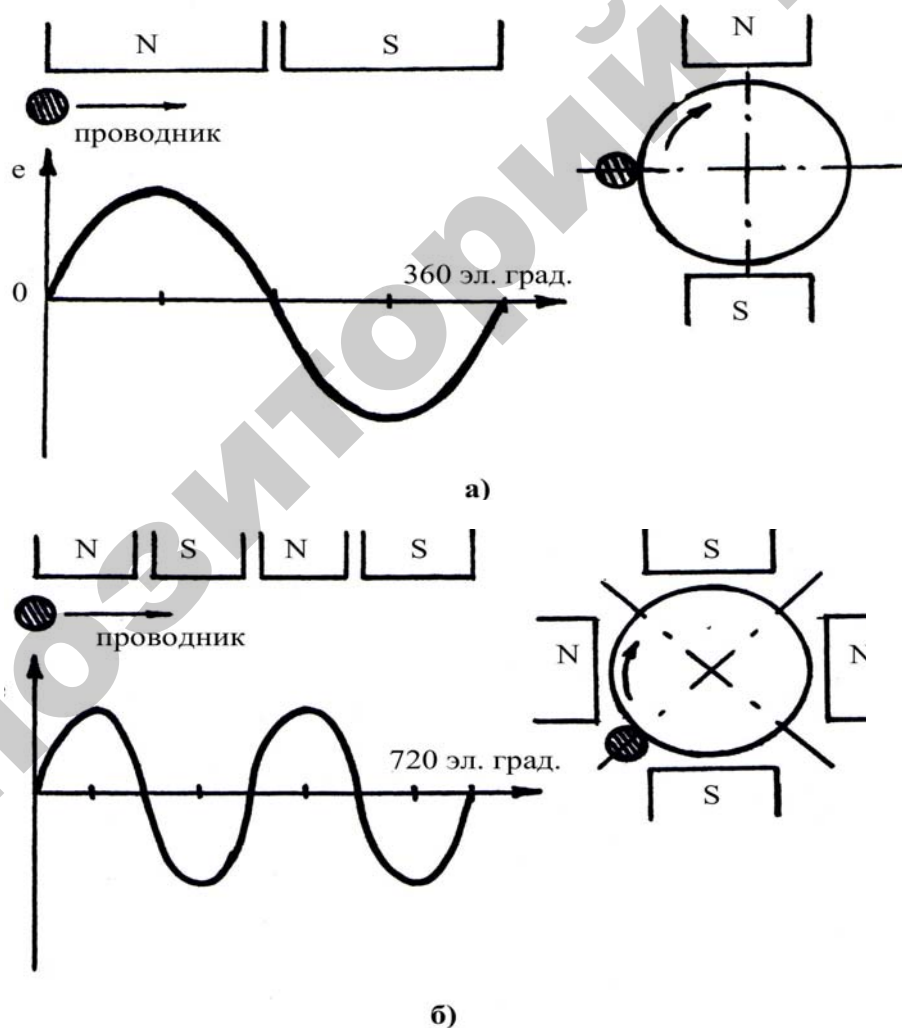


Рисунок 2.4 – Число электрических градусов в расточке статора электромашин в зависимости от числа пар полюсов: а – при одной паре; б – при двух парах

Это показывает изменение ЭДС ( $e$ ) в проводнике, если его провести (или сделать один оборот ротора) под одной парой полюсов.

Известно, что  $e = Blv$ , ( $B$  – магнитная индукция;  $l$  – длина проводника;  $v$  – скорость движения проводника).

Отсюда следует, что при постоянных  $l$  и  $v$ , изменение величины  $e$  зависит только от изменения величины  $B$ .

При перемещении проводника под одной парой полюсов происходит *полный цикл* изменения величины  $e$  в нем. Следовательно, так же меняется и магнитный поток (и индукция  $B$ ). Синусоида делится на  $360^\circ$ эл., значит, на одну пару полюсов приходится  $360^\circ$ эл.

При движении проводника под двумя парами полюсов (за один оборот) (рисунок 2.4, б) ЭДС в нем изменится два раза по  $360^\circ$ эл. ( $360^\circ \times 2 = 720^\circ$ эл.), то есть в общем случае в любой машине число электрических градусов в расточке статора можно определить по формуле

$$\alpha = 360^\circ P. \quad (2.24)$$

Если магнитопровод имеет число пазов равное  $z$ , то число электрических градусов, приходящихся на один паз, или, иначе, угловой сдвиг между рядом лежащими пазами можно определить по формуле

$$\alpha = \frac{360^\circ P}{z}. \quad (2.25)$$

### 2.3.5 Число параллельных ветвей ( $a$ )

Параллельные ветви в обмотке асинхронного двигателя делаются для сокращения сечения обмоточного провода, кроме того, в определенной мере это дает возможность лучше загрузить магнитную систему машины.

Применяя решение о способе внутрифазного соединения катушечных групп, надо учитывать, что при числе катушечных групп в фазе меньше числа полюсов электродвигателя соединение катушечных групп необходимо выполнять в следующей последовательности: конец первой катушечной группы соединяют с началом второй катушечной группы, конец второй катушечной группы соединяют с началом третьей катушечной группы и т. д., то есть соединяются конец с началом (пример на рисунке 2.5). Такой вид соединения называется *последовательным* или *согласным*.

При числе катушечных групп в фазе, равном числу полюсов электродвигателя, они соединяются в следующей последовательности: конец первой катушечной

группы соединяется с концом второй катушечной группы, начало второй катушечной группы соединяется с началом третьей катушечной группы, конец третьей катушечной группы соединяется с концом четвертой группы и т. д., то есть соединяются конец с концом, начало с началом. Такое соединение относится ко всем двухслойным обмоткам и к тем однослойным, у которых катушечные группы разделены на катушечные полугруппы, и поэтому число полугрупп в фазе таких обмоток равно числу полюсов (однослойные обмотки «вразвалку») (пример на рисунке 2.6, а). Такой вид соединения называется *параллельным* или *встречным*.

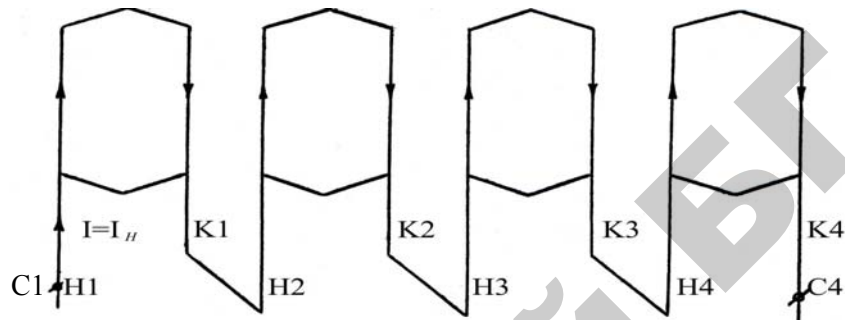


Рисунок 2.5 – Катушечные группы, включенные в одну параллельную ветвь,  $a = 1$

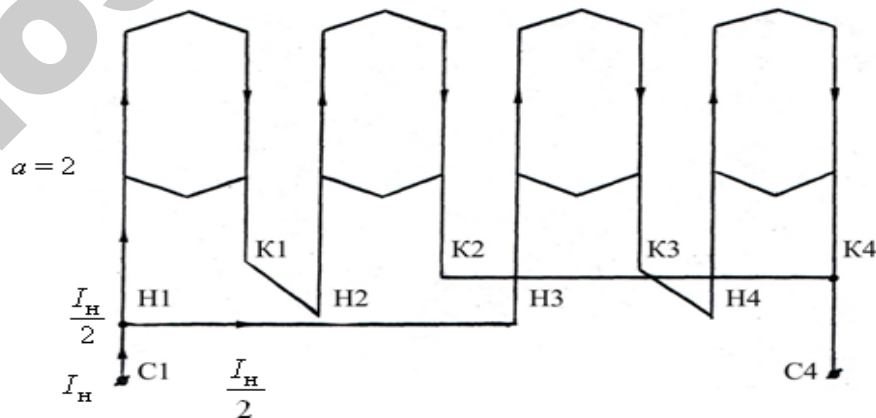
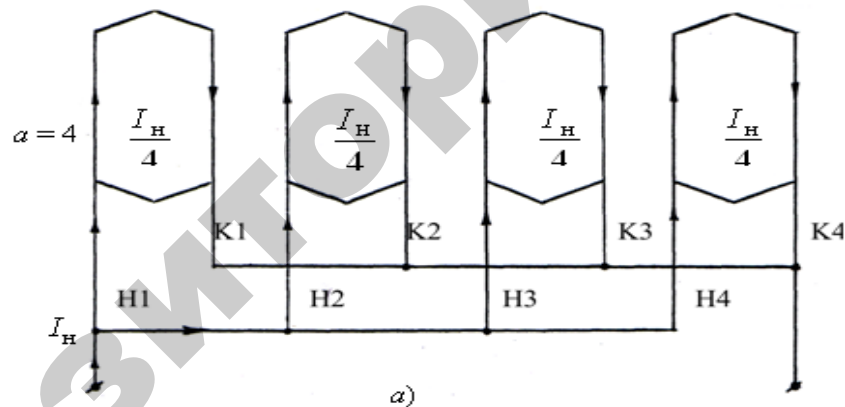


Рисунок 2.6 – Катушечные группы обмотки одной фазы, включенные:  
а) в четыре параллельных ветви ( $a = 4$ ); б) в две параллельные ветви ( $a = 2$ )

Можно катушечные группы обмотки одной фазы соединять и комбинированно (часть *согласно* и часть *встречно*) как показано на рисунке 2.6, б,  $a = 2$ , но при этом в любом случае число катушечных групп в каждой параллельной ветви должно быть строго одинаковым.

## 2.4 Принцип построения схемы статорной обмотки трехфазного асинхронного двигателя

Для получения вращающегося переменного магнитного поля трехфазного асинхронного двигателя при любой схеме обмотки требуется выполнение следующих условий:

1. Смещение *в пространстве* рачотки статора асинхронного электродвигателя фазных обмоток одна относительно другой на  $120^\circ$  эл.

2. Смещение *во времени* токов, протекающих по фазным обмоткам, на одну треть периода (следовательно, векторы, изображающие указанные токи на плоскости, будут сдвинуты на  $120^\circ$  эл.).

Первое условие выполняется соответствующей укладкой катушечных групп трехфазной обмотки, второе – подключением асинхронных двигателей к сети трехфазного тока, в которой временной сдвиг между напряжениями трех фаз обеспечивается генераторами электрических станций. Эти напряжения в замкнутых цепях обмоток машин создают нужный сдвиг токов.

### 2.4.1 Построение схем однослойных трехфазных статорных обмоток

Как было указано ранее, однослойными называются обмотки, у которых в одном пазу находятся проводники, принадлежащие активной стороне одной секции. В общем, трехфазные однослойные обмотки подразделяются на *равнокатушечные* или *петлевые* (имеющие одинаковый расчетный шаг на каждую секцию в катушечной группе) и *концентрические* (обмотки, у которых секции, komponующие катушечную группу, имеют разный расчетный шаг, а укладка таких секций идет одна вовнутрь другой).

Рассмотрим сходства и отличия в построении схем таких типов обмоток. В качестве примера рассмотрим построения обмоток по заданию:  $z = 24$ ;  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ ;  $f = 50 \text{ Гц}$ ;  $m = 3$ .

Для определения обмоточных данных необходимо знать полюсность машины. Для этого число пар полюсов находим по выражению (2.3):

$$P = \frac{60f}{n} = \frac{60 \cdot 50}{1500} = 2.$$

Расчет обмоточных данных начинаем с определения шага обмотки по формуле (2.16):

$$y' = \frac{z}{2P} \pm \varepsilon = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6.$$

Полученный расчетный шаг подходит для построения схемы однослойной петлевой статорной обмотки независимо от того, сколько секций приходится на одну катушечную группу. Для построения схемы концентрической обмотки надо знать конкретное число секций, так как ранее было отмечено, что каждая секция, входящая в катушечную группу, для концентрической обмотки имеет свой расчетный шаг. Поэтому для дальнейших расчетов необходимо определить число секций на одну катушечную группу  $q$ . Это значение находим по формуле (2.23):

$$q = \frac{z}{2pt} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2.$$

Исходя из полученного значения, можно сделать вывод, что каждая фазная катушка как для однослойной петлевой обмотки, так и для однослойной концентрической обмотки в рассматриваемом примере будет состоять из двух секций.

Если принять, что укладку обмотки начать с паза, принятого за первый, то катушечная группа однослойной петлевой обмотки займет пазы 1–7 и 2–8 (рисунок 2.7).

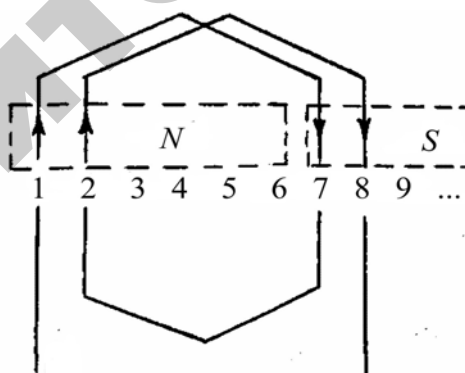


Рисунок 2.7 – Катушечная группа однослойной петлевой обмотки при  $q = 2$  и  $y' = 6$

Для построения схемы однослойной концентрической обмотки для данного примера необходимо знать два шага  $y_1$  и  $y_2$ .

Если принять за первый шаг  $y_1$  шаг, который относительно других секций имеет больший размер, то в зависимости от числа секций, входящих в катушечную группу, этот шаг будет определяться:

$$y_1 = 4q - 1. \quad (2.26)$$

Для рассматриваемого примера выше было определено, что число секций, приходящихся на одну катушечную группу, равно 2, следовательно, шаг первой секции  $y_1$  будет равен:

$$y_1 = 4 \cdot 2 - 1 = 7.$$

Шаг второй секции этой катушечной группы, которая должна располагаться внутри первой катушечной группы, должен быть меньше первого на 2 (так как одна секция имеет две активные стороны):

$$y_2 = y_1 - 2. \quad (2.27)$$

При расчете это будет составлять:

$$y_2 = 7 - 2 = 5.$$

Таким образом, при  $q = 2$  и  $y' = 6$ , получаем  $y_1 = 7$ ,  $y_2 = 5$ .

Для того, чтобы убедиться в правильности расчета, проводится проверка по выражению

$$\frac{y_1 + \dots + y_n}{q_n} = y', \quad (2.28)$$

где  $n$  – число секций, входящих в катушечную группу, то есть  $n = q$ .

Для нашего примера такая проверка должна выглядеть следующим образом:

$$\frac{y_1 + y_2}{2} = 6.$$

Подставляем найденные значения  $y_1$  и  $y_2$ :

$$\frac{7 + 5}{2} = 6.$$

Следовательно, расчет выполнен верно.

Катушечная группа однослойной концентрической обмотки при  $q = 2$  и  $y_1 = 7$ ,  $y_2 = 5$  показана на рисунке 2.8.

Далее необходимо определить число катушечных групп, приходящихся как на одну фазу, так и на всю статорную обмотку.

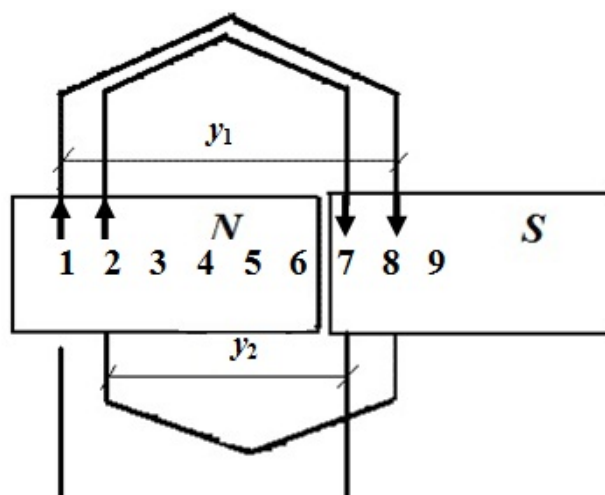


Рисунок 2.8 – Катушечная группа однослойной concentрической обмотки при  $q = 2$  и  $y_1 = 7$ ;  $y_2 = 5$

Число катушечных групп в одной фазе для однослойной петлевой и concentрической статорной обмотки определим по формуле (2.18):

$$N_{1\Phi}^{(1)} = P = 2.$$

На три фазы, соответственно, число катушечных групп будет определяться по формуле (2.19) и будет равно:

$$N_{3\Phi}^{(1)} = Pm = 2 \cdot 3 = 6.$$

Для того, чтобы определить смещение катушечных групп относительно друг друга внутри фазы, необходимо знать следующую величину, относящуюся к обмоточным данным – число электрических градусов, приходящихся на один паз  $\alpha$ , определяемое по формуле (2.25):

$$\alpha = \frac{360^\circ P}{z} = \frac{360^\circ \cdot 2}{24} = 30^\circ \text{ эл.}$$

В однослойной обмотке первая катушечная группа участвует в создании первой пары полюсов (рисунок 2.9), вторая должна создавать вторую пару полюсов, следовательно, расстояние между ними должно быть равно одной паре полюсов, то есть  $360^\circ$  эл.

Отсюда сдвиг между катушечными группами одной фазы в пазах

$$A = B = C = \frac{360^\circ}{\alpha} = \frac{360^\circ}{30^\circ} = 12 \text{ пазов.}$$

Следовательно, если первую катушечную группу начали укладывать с 1-го паза, то начало второй катушечной группы должно размещаться через  $360^\circ$  эл., что согласно вышеприведенному расчету составляет 12 пазов. Тогда вторая катушечная группа фазы «А» должна начаться через двенадцать пазов относительно первого, то есть – с 13-го паза (рисунки 2.9, 2.10).

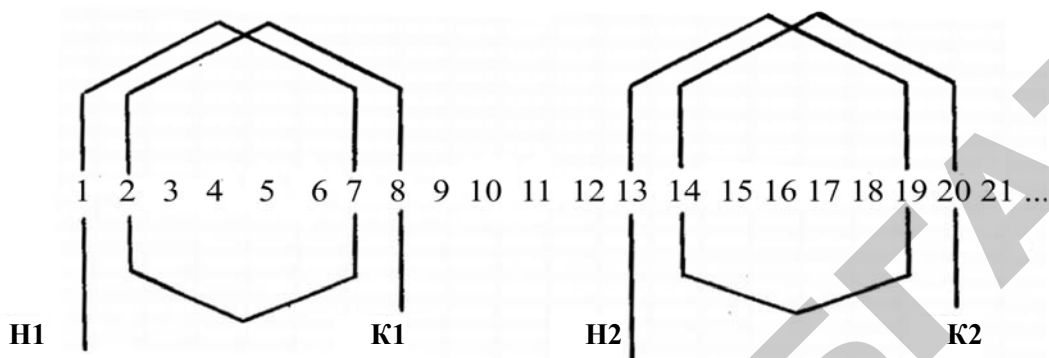


Рисунок 2.9 – Размещение катушечных групп в одной фазе однослойной петлевой статорной обмотки при  $z = 24$ ;  $P = 2$ ;  $N_{1\Phi}^{(1)} = 2$

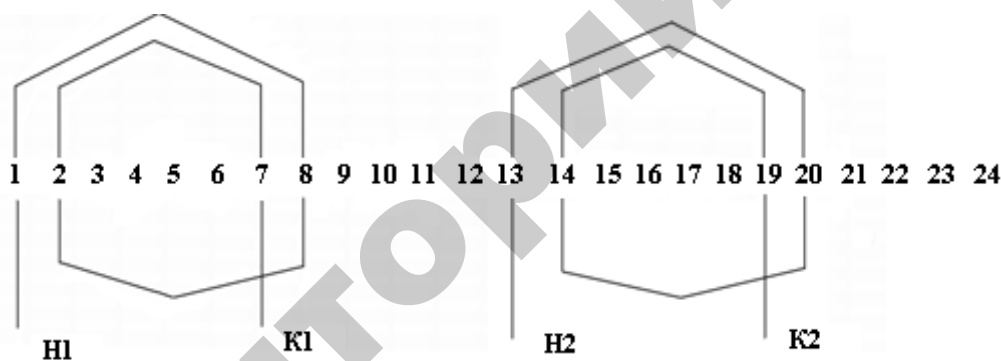


Рисунок 2.10 – Размещение катушечных групп в одной фазе однослойной concentрической статорной обмотки при  $z = 24$ ;  $P = 2$ ;  $N_{1\Phi}^{(1)} = 2$

Как правило, на клеммный щиток машины выводятся 6 выводов, три из которых – начала фаз и которые присоединяются к источнику питания по линиям  $L1$ ,  $L2$ ,  $L3$ , и три вывода – это концы фаз, которые участвуют в создании схемы соединения «звезда» или «треугольник». Но до этого внутри каждой фазы необходимо произвести соединение катушечных групп. Ранее было указано, что внутрифазное соединение катушечных групп может быть последовательным, параллельным или комбинированным. Для однослойных обмоток любого типа, для соблюдения полюсности в обмотке, необходимо соединять катушечные группы последовательно, то есть конец предыдущей катушечной группы с началом следующей.



В нашем случае катушечные группы будут соединяться внутрифазно так, как это показано на рисунке 2.11 для однослойной петлевой обмотки. Для однослойной concentрической обмотки соединение катушечных групп внутри фазы будет выполнено аналогично.

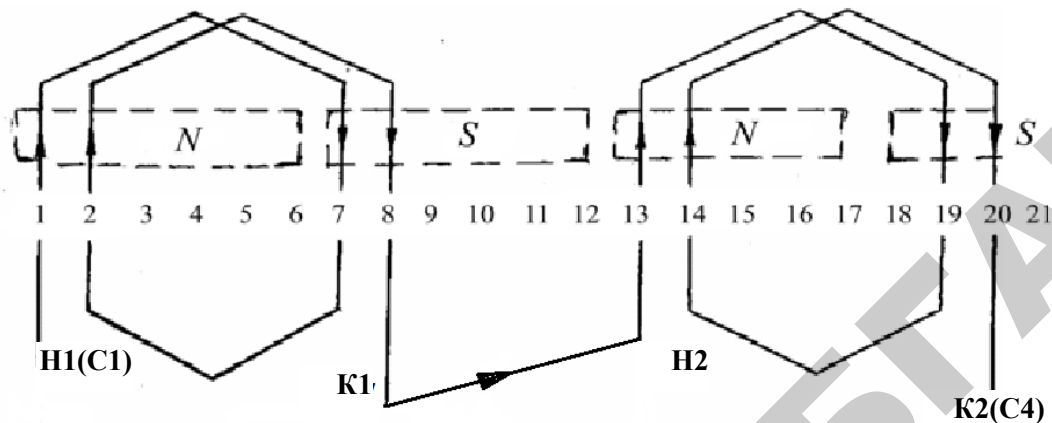


Рисунок 2.11 – Внутрифазное соединение катушечных групп с указанием направления токов в активных сторонах секций

Последовательность укладки и внутрифазное соединение двух катушечных групп оставшихся двух фаз должно быть выполнено аналогично, как и для первой фазы. Особенность укладки состоит только в том, что для получения в расточке статора вращающегося переменного магнитного поля, согласно первому условию, эти фазы должны быть смещены в пространстве относительно первой на  $120^\circ$  и  $240^\circ$  эл. соответственно (2.29), (2.30).

$$B = \frac{120^\circ}{\alpha}; \quad (2.29)$$

$$C = \frac{240^\circ}{\alpha}. \quad (2.30)$$

То есть смещение фаз в пазах для рассматриваемого варианта должно составлять:

$$B = \frac{120^\circ}{\alpha} = \frac{120^\circ}{30^\circ} = 4; \quad C = \frac{240^\circ}{\alpha} = \frac{240^\circ}{30^\circ} = 8.$$

Исходя из расчета, получаем, что вторая фаза относительно первой должна быть смещена на 4 паза, то есть ее начало будет находиться в пазу 5, а третья фаза относительно второй должна быть смещена также на 4 паза или на 8 относительно первой, то есть начало третьей фазы будет находиться в пазу 9.

Полностью выполненная схема однослойной петлевой статорной обмотки с расстановкой токов в активных проводниках согласно второму условию получения вращающегося поля представлена на рисунке 2.12.

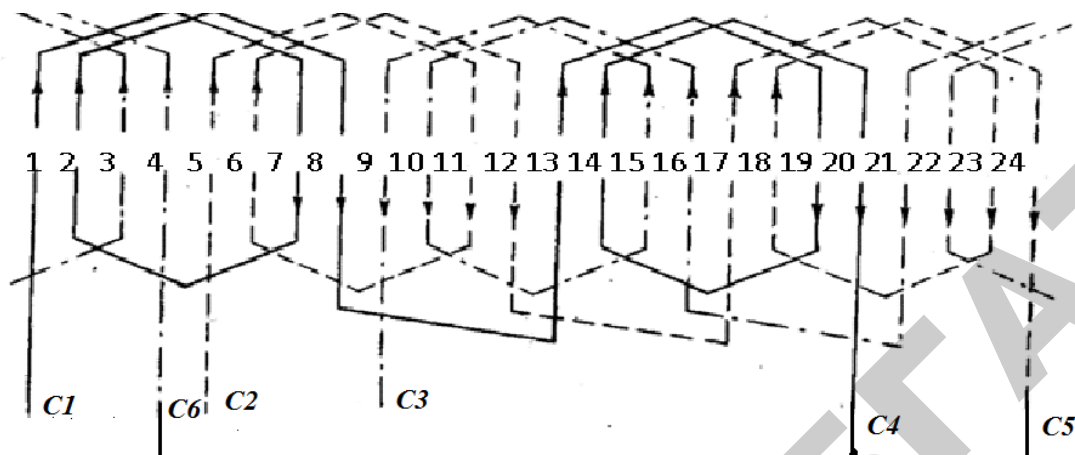


Рисунок 2.12 – Развернутая схема однослойной петлевой статорной обмотки при  $N_{3\Phi}^{(1)} = 6$ ;  $y' = 6$ ;  $q = 2$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $a = 1$

Схема однослойной concentрической обмотки на  $z = 24$  и  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  показана на рисунке 2.13.

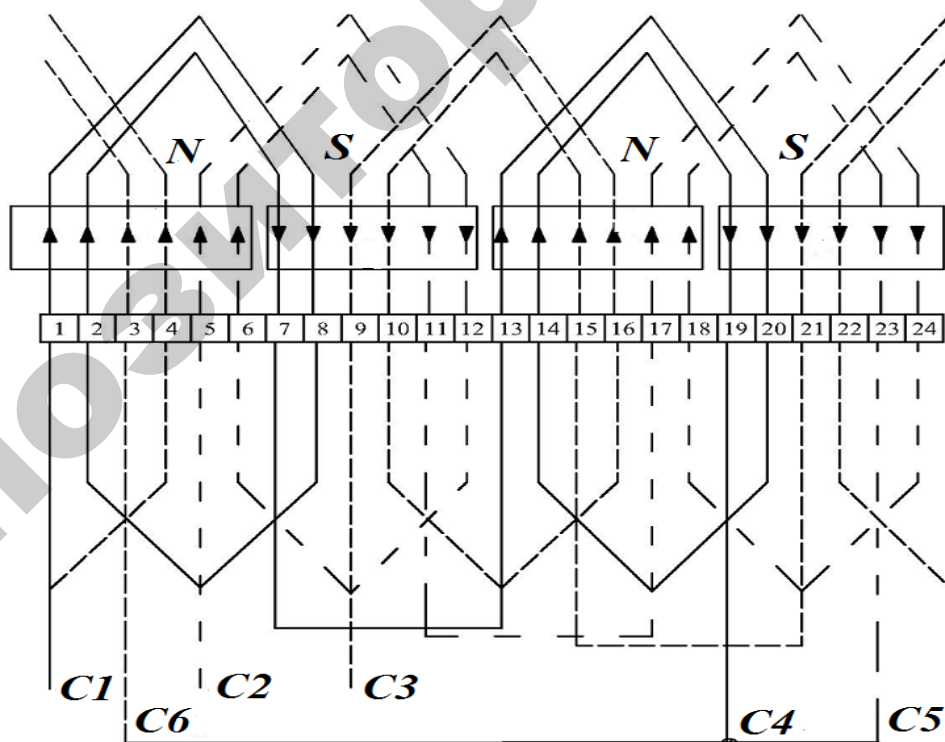


Рисунок 2.13 – Развернутая схема однослойной concentрической статорной обмотки при  $N_{3\Phi}^{(1)} = 6$ ;  $y' = 6$ ;  $q = 2$ ;  $\alpha = 30^\circ$ ;  $a = 1$

Указанное направление токов в активных проводниках и расстановка полюсов на приведенных схемах соответствует принятому моменту времени  $t_1$ , равному  $1/150$  с (одна треть периода трехфазного тока по времени).

Для принятого момента  $t_1$  на развертке  $I = f(t)$  (рисунок 2.14, а) приведена векторная диаграмма токов, показанная на рисунке 2.14, б. Из векторной диаграммы следует, что в момент  $t_1$ , токи в обмотках фаз «А» и «В» протекают в одном направлении, а в обмотке фазы «С» ток имеет противоположное направление, причем сумма первых ( $I_a + I_b$ ) равна  $I_c$ .

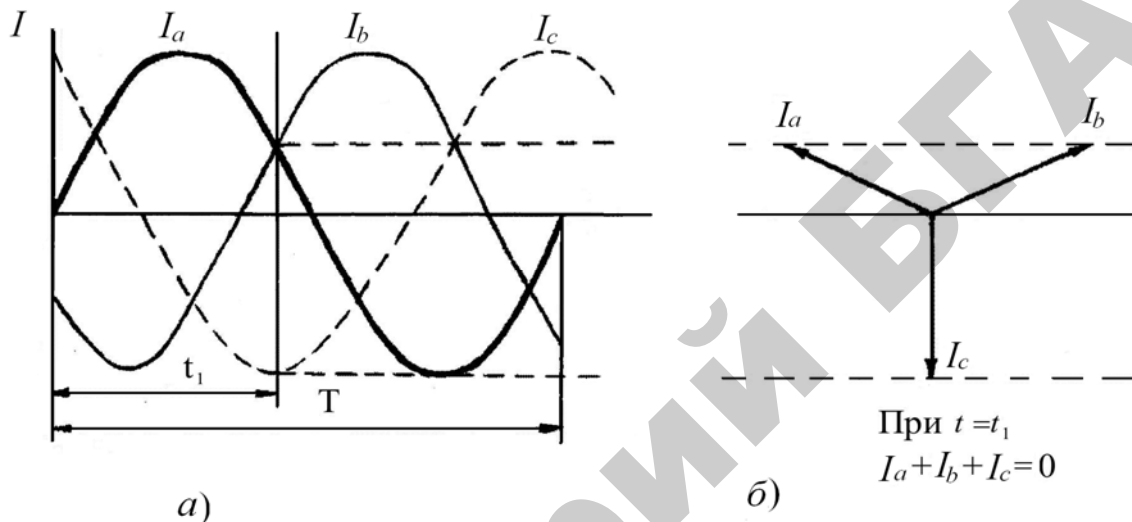


Рисунок 2.14 – а) развертка зависимости токов от времени  $I = f(t)$ ;  
б) векторная диаграмма токов для момента времени  $t_1$

#### 2.4.2 Построение схем двухслойных трехфазных статорных обмоток

Напомним, что к двухслойным относятся обмотки, у которых в одном пазу находятся стороны двух секций, разделенные между собой межслоевой изоляцией. Каждая секция также располагается в двух слоях: один слой укладывают на дно пазов, а другой располагается над ним. Лобовые части тоже занимают два слоя и переход из слоя в слой у них происходит в «головках» секций.

Для примера рассмотрим построение двухслойной статорной обмотки с укороченным шагом трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором по тем же условиям заказчика, по которым производился расчет однослойной петлевой статорной обмотки:  $z = 24$ ;  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup>;  $f = 50$  Гц.

В отличие от однослойных, в двухслойных обмотках в одной фазе в два раза больше катушечных групп (2.20):

$$N_{1\Phi}^{(2)} = 2P = 4.$$

Кроме того, катушечные группы, принадлежащие одной фазе, имеют смещение относительно друг друга не на  $360^\circ$  эл. (как в однослойных обмотках), а на  $180^\circ$  эл. (на полюсное деление).

Отсюда следует, что число катушечных групп на всю статорную обмотку будет определяться (2.21):

$$N_{3\phi}^{(2)} = 2Pm = 12.$$

Двухслойные обмотки редко выполняются с полным диаметральным шагом. Большинство обмоток статора делают с укороченным шагом, так как укорочение шага значительно улучшает электрические свойства машины и дает экономию обмоточного провода. Обычно шаг укорачивают на  $5/6$  диаметрального шага или в расчетах коэффициент укорочения  $K_y$  обычно принимают равным  $0,8$ . Поэтому изначально по формуле (2.5) находим полный диаметральный шаг

$$y' = \frac{z}{2P} = \frac{24}{2 \cdot 2} = 6.$$

Укороченный шаг обмотки находим по выражению (2.31):

$$y = y' \cdot K_y = y' \cdot 0,8, \quad (2.31)$$

где  $K_y$  – коэффициент укорочения.

$$y = 6 \cdot 0,8 = 4,8 \approx 5.$$

Следовательно, обмотка будет выполнена с укороченным шагом, равным  $5$ . Укорочение шага уменьшает размер полюсного деления. Так, согласно расчету, на один полюс уже будет приходиться не  $6$  пазов, как если бы обмотка выполнялась без укорочения шага, а  $5$ . За счет этого между полюсами появляются пазы, имеющие встречное направление тока в активных проводниках, как это показано на рисунке 2.15.

По выражениям (2.23), (2.25) определяем число пазов на полюс и фазу  $q$  и число электрических градусов на один паз  $\alpha$ .

По расчету получим, что  $q = 2$ ,  $\alpha = 30^\circ$  эл.

Изначально принимаем число параллельных ветвей:  $a = 1$ . При этом надо помнить, что при внутрифазном соединении катушечных групп надо соединять одноименные выводы, то есть начало группы с началом следующей и конец группы с концом следующей (см. рисунок 2.15).

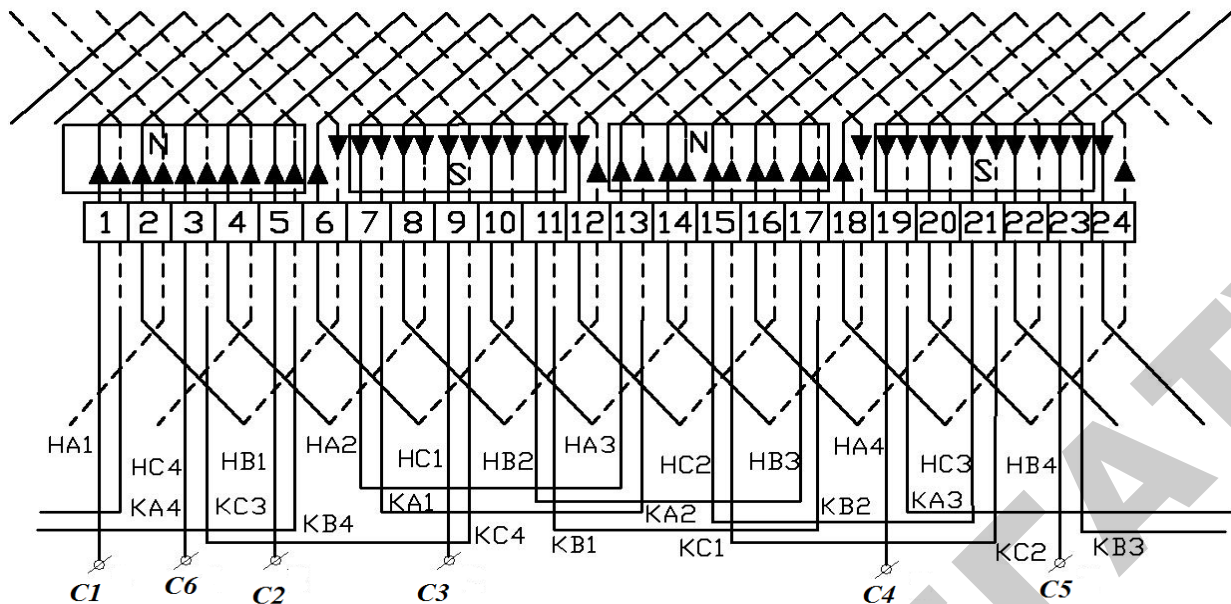


Рисунок 2.15 – Развернутая схема двухслойной петлевой статорной обмотки с укороченным шагом

Параллельные соединения должны быть выполнены так, чтобы направление тока в проводниках и полярность полюсов остались теми же, какими они были при последовательном соединении. В двухслойных обмотках наибольшее возможное число параллельных ветвей равно числу полюсов:

$$a_{\max} = 2P. \quad (2.32)$$

Для полного выполнения двухслойной статорной обмотки, согласно первому условию получения вращающегося переменного магнитного поля в рачотке статора, надо определить расположение фаз в пространстве относительно друг друга по формулам (2.29) и (2.30), уложить поочередно каждую фазу, выполнив внутрифазное соединение катушечных групп согласно правилу, указанному выше, для принятого момента времени  $t_1$  задаться направлением токов в каждой фазе и определить расстановку полюсов.

Выполненная развернутая схема двухслойной статорной обмотки показана на рисунке 2.15.

### 2.4.3 Построение схем трехфазных статорных обмоток с дробным числом пазов на полюс и фазу

Число пазов на полюс и фазу  $q$  не всегда бывает целым числом. Часто встречаются обмотки, у которых число пазов на полюс и фазу выражается дробным

числом. В асинхронных двигателях дробное число пазов на полюс и фазу обычно получают в тех случаях, когда один и тот же статор обматывают на разное число полюсов. Тогда при одном и том же числе пазов статора число пазов на полюс и фазу для одной обмотки получается целым, а для другой – дробным.

К примеру, статор с  $z = 36$  обматывают на 6 полюсов. Двигатель имеет синхронную частоту вращения  $n = 1000 \text{ мин}^{-1}$ . Определяем число пазов на полюс и фазу по выражению (2.23):

$$q = \frac{z}{2Pm} = \frac{36}{2 \cdot 3 \cdot 3} = 2.$$

Если этот же двигатель требуется перемотать на меньшее число оборотов  $n = 750 \text{ мин}^{-1}$ , то есть на 8 полюсов, то число пазов на полюс и фазу будет (2.23)

$$q = \frac{z}{2Pm} = \frac{36}{2 \cdot 4 \cdot 3} = 1\frac{1}{2}.$$

Разница по сравнению с обмотками, имеющими целое число пазов на полюс и фазу, заключается в том, что при дробном числе  $q$  обмотку приходится комбинировать из катушечных групп, состоящих из неодинакового числа секций. При этом в каждой фазе должно быть одинаковое число пазов, иначе обмотка получится несимметричной.

Дробное число пазов на полюс и фазу означает, что в данной обмотке число секций в катушечных группах неодинаково, то есть в одних катушечных группах число катушек на одну больше, чем в других. Как правило, полученное дробное значение числа пазов на полюс и фазу  $q$  переводят в правильную дробь:

$$q = b + \frac{c}{d}, \quad (2.33)$$

где  $b$  – целое число;

$c$  – числитель правильной дроби;

$d$  – знаменатель правильной дроби.

При выполнении схем таких обмоток часть катушечных групп выполняется из числа секций равных  $(b + 1)$ , а часть – из  $b$  секций.

Например, если число пазов на полюс и фазу равно  $2\frac{1}{2}$ , то обмотку составляют из чередующихся катушечных групп, имеющих по две и три секции. Причем после каждой группы из двух катушек следует группа из трех катушек.

Такое простое сочетание катушечных групп получают только в том случае, когда дробная часть числа, выражающего число пазов на полюс и фазу, равна  $\frac{1}{2}$ . При других дробях комбинирование катушечных групп более сложное.

Часто дробное сочетание выражают в виде неправильной дроби  $q = \frac{c}{d}$ .

При  $q = 2\frac{1}{2}$ :  $c = 5$ ;  $d = 2$ .

Перед выполнением обмотки, следует проверить, будет такая обмотка симметричной или нет. Для получения симметрии обмотки необходимо, чтобы  $\frac{z}{tm}$  равнялось целому числу, где  $z$  – число пазов;  $t$  – наибольший общий делитель для  $z$  и  $P$ ;  $m$  – число фаз.

Это условие является достаточным для двухслойной обмотки. Для однослойной обмотки, кроме того, необходимо, чтобы  $\frac{z}{2m}$  равнялось целому числу. Обмотка не будет симметричной, если знаменатель дроби равен трем, однако такие обмотки встречаются на практике.

Катушечные группы в обмотке с дробным числом пазов на полюс и фазу легко распределить при помощи таблицы с числом строк, равным числу полюсов, и числом клеток в строке, равным  $3c$ , где  $c$  – числитель неправильной дроби, выражающей число пазов на полюс и фазу.

Таблицу разделяют на три одинаковых столбца с числом клеток в столбце, равным  $c$ . Затем в клетки вписывают в последовательном порядке номера пазов с шагом между ними, равным  $d$ , где  $d$  – знаменатель дроби, выражающей число пазов на полюс и фазу.

Составим схему двухслойной статорной обмотки со следующими данными:

$$z = 27; p = 3 (n = 1000 \text{ мин}^{-1}); m = 3; y' = 4,5; y = 4; q = 1,5 = 1\frac{1}{2} = \frac{3}{2}; \alpha = 40^\circ \text{ эл.}; a = 1.$$

Для этой обмотки  $t = 3$ . Тогда

$$\frac{z}{tm} = \frac{27}{3 \cdot 3} = 3.$$

Таким образом, обмотка удовлетворяет условиям симметрии. Составим таблицу обмотки с числом клеток 3 в каждой колонке и впишем номера пазов с интервалом 2, то есть, пропуская 1 клетку (таблица 2.2).

Читая горизонтальные строки таблицы, будем записывать обозначения фаз столько раз, сколько номеров стоит в столбце фазы. Это покажет группировку катушек по фазам: АА С ВВ А СС В АА С ВВ А СС В АА С ВВ А СС В.

Таблица 2.2 – Распределение пазов и секций по фазам обмотки

Полюсы	Фаза А			Фаза С			Фаза В		
<i>N</i>	1		2		3		4		5
<i>S</i>		6		7		8		9	
<i>N</i>	10		11		12		13		14
<i>S</i>		15		16		17		18	
<i>N</i>	19		20		21		22		23
<i>S</i>		24		25		26		27	

Буквы обозначают фазы, а число одинаковых букв подряд показывает, сколько содержится секций в катушечной группе. Для данной обмотки необходимо заготовить 9 катушечных групп по две секции и 9 одиночных. Они займут  $(9 \cdot 2) + 9 = 27$  пазов.

При укладке в пазы, согласно группировке, после каждой катушечной группы, состоящей из двух секции, надо класть катушечную группу, состоящую из одной секции. Схема обмотки показана на рисунке 2.16.

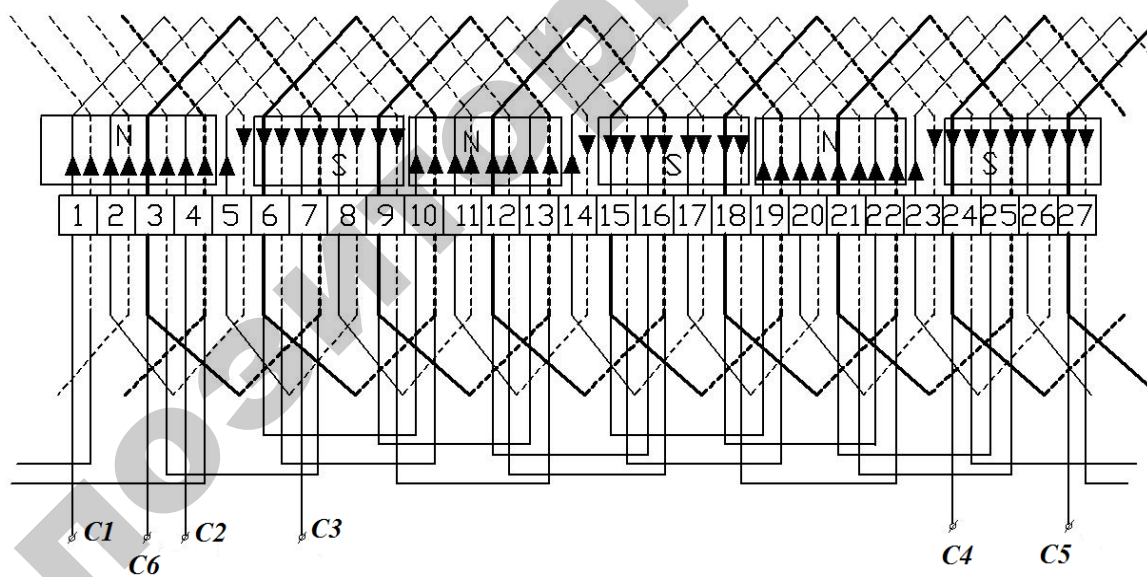


Рисунок 2.16 – Схема двухслойной статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с дробным числом пазов на полюс и фазу

Рассмотрим еще один пример. Определить возможность выполнения статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя по следующим данным:  $z = 54$ ;  $p = 4$  ( $n = 750$  мин<sup>-1</sup>);  $m = 3$ ;  $y' = 6,75$ ;  $y = 5$ ;  $q = 2,25 = 2\frac{1}{4} = \frac{9}{4}$ ;  $\alpha = 26,6^\circ$  эл.;  $a = 1$ .



Для проверки условия симметрии, находим, есть ли общий делитель для  $z$  и  $p$ . Для чисел 54 и 4 общим делителем  $t$  является число 2. Следовательно, условие симметрии выполняется.

$$\frac{z}{tm} = \frac{54}{2 \cdot 3} = 9.$$

Составим таблицу обмотки с числом клеток 9 в каждой колонке и впишем номера пазов с интервалом 4, то есть, пропуская 3 клетки (таблица 2.3).

Таблица 2.3 – Распределение пазов и секций по фазам обмотки по следующим данным:  $z = 54; p = 4; m = 3; q = 2,25 = 2\frac{1}{4} = \frac{9}{4}$

	Фаза А						Фаза С						Фаза В								
<i>N</i>	1			2			3			4			5			6			7		
<i>S</i>		8			9			10			11			12			13			14	
<i>N</i>			15			16			17			18			19			20			21
<i>S</i>				22			23			24			25			26			27		
<i>N</i>	28			29			30			31			32			33			34		
<i>S</i>		35			36			37			38			39			40			41	
<i>N</i>			42			43			44			45			46			47			48
<i>S</i>				49			50			51			52			53			54		

Определим порядок чередования катушечных групп: ААА СС ВВ АА ССС ВВ АА СС ВВВ АА СС ВВ и т. д.

Катушечные группы расположены в таком порядке:

$$(3-2-2-2)-(3-2-2-2)-(3-2-2-2)-\dots$$

Как видно из порядка чередования, оно повторяется через четыре цифры. Значит, порядок укладки катушечных групп будет следующий: тройная–двойная–двойная–двойная и т. д.

Сумма цифр в одном чередовании показывает число секций, которое равно 9 ( $3 + 2 + 2 + 2$ ). Всего катушек должно быть 54, поэтому по всей обмотке будет  $54 : 9 = 6$  чередований. В каждом чередовании одна тройная катушечная группа (из трех секций) и три двойные (из двух секций). Всего на статор потребуется 6 катушечных групп тройных и 18 двойных.

При помощи таких таблиц можно определить чередование катушечных групп для любой обмотки с дробным числом пазов на полюс и фазу.

В таблице 2.4 показано чередование катушечных групп для наиболее часто встречающихся в практике чисел пазов на полюс и фазу.

Если целое число перед дробью больше 1, то в таблице чередований надо прибавить к каждой цифре разницу между этим числом и единицей. Так, например, при  $q = 1\frac{1}{2}$  в таблице чередуются катушечные группы из 1 и 2 катушек (1–2), а при  $q = 2\frac{1}{2}$  чередуются катушечные группы из 2 и 3 катушек (2–3).

Таблица 2.4 – Порядок чередования катушечных групп при дробных числах пазов на полюс и фазу

Число пазов на полюс и фазу	Порядок чередования катушечных групп
$1\frac{1}{2}$	(1–2), (1–2), (1–2), (1–2) и т. д.
$1\frac{1}{4}$	(1–1–1–2), (1–1–1–2) и т. д.
$1\frac{3}{4}$	(1–2–2–2), (1–2–2–2) и т. д.
$1\frac{1}{5}$	(1–1–1–1–2), (1–1–1–1–2) и т. д.
$1\frac{2}{5}$	(2–1–2–1–1), (2–1–2–1–1) и т. д.
$1\frac{3}{5}$	(1–2–1–2–2), (1–2–1–2–2) и т. д.
$2\frac{1}{2}$	(2–3), (2–3) и т. д.
$3\frac{1}{4}$	(3–3–3–4), (3–3–3–4) и т. д.
$4\frac{1}{5}$	(4–4–4–4–5), (4–4–4–4–5) и т. д.

Цифры в данной таблице чередуются не в беспорядке, а определенными периодами. Число цифр в периоде равно знаменателю неправильной дроби  $d$ , а сумма цифр в периоде равна числителю неправильной дроби  $c$ .

Например, при  $q = 2\frac{3}{5} = \frac{8}{5}$  период состоит из пяти цифр (1–2–1–2–2). Сумма этих цифр равна 8, то есть числителю дроби.

В заключение можно отметить, что во всех обмотках расстояние между началами фаз равно  $2q$ . В обмотках, имеющих дробное число на полюс и фазу, произведение  $2q$  не всегда может выражаться целым числом. В таких случаях за  $2q$  принимается ближайшее целое число или то, что смещение между началами и концами фаз составляет не  $120^\circ$  эл., а  $480^\circ$  эл., так как  $\sin 120^\circ = \sin 480^\circ$ . Тогда смещение между фазами в пазах  $n_z$  будет равно

$$n_z = \frac{480^\circ}{\alpha}.$$

Если принять, что фаза «А» будет начинаться с паза, условно принятого за первый, то есть  $H_A = 1$ , то начала фаз «В» и «С» соответственно, будут располагаться:  $H_B = n_z + 1$ ;  $H_C = 2n_z + 1$ .

В обмотках с дробным  $q$ , имеющих дробь  $\frac{1}{2}$ , отпадает необходимость определять, сколько будет катушечных групп с целым числом секций, равным  $b$ , и сколько будет катушечных групп с числом секций, равным  $b + 1$ . Во всех обмотках, имеющих дробное  $q$  с дробью, равной  $\frac{1}{2}$ , числа катушечных групп с меньшим и большим количеством секций распределяются поровну, и поэтому, зная число секций в фазе, легко подсчитать, сколько будет больших и малых катушечных групп.

## 2.5 Расчет параметров статорной обмотки

### 2.5.1 Определение числа витков на одну фазу $W_\Phi$ и одну секцию $W_{\text{СЕК}}$

Известно, что мощность асинхронного электродвигателя прямопропорциональна величине магнитного потока  $\Phi$ , создаваемого в статорной обмотке, то есть  $P_{\text{АД}} \equiv \Phi$ .

Рассмотрим, какие процессы происходят в статорной обмотке электродвигателя (на примере одной из фаз) при его подключении к источнику питания. Примем, что машина работает на холостом ходу.

При подаче напряжения  $U_\Phi$  на обмотку по ней потечет ток холостого хода  $I_{xx}$  (рисунок 2.17).

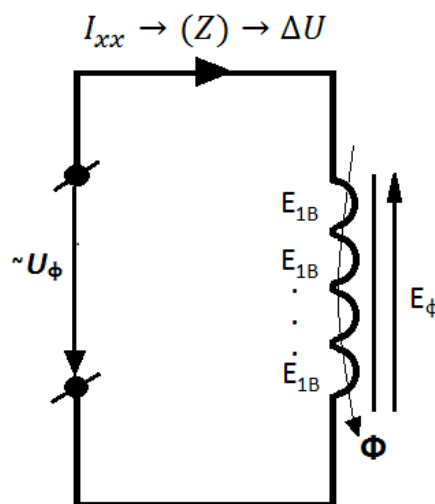


Рисунок 2.17 – Принципиальная схема работы трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором в режиме холостого хода

Так как напряжение изменяется по периодическому синусоидальному закону, то ток тоже будет переменным. В свою очередь, ток создаст в магнитной системе машины магнитный поток  $\Phi$ , который также будет переменным.

Переменный магнитный поток  $\Phi$  индуцирует в витках обмотки, которая его создала, ЭДС фазы  $E_\phi$ , которая, согласно закону электромагнитной индукции, будет направлена встречно приложенному напряжению  $U_\phi$ .

Для обеспечения нормальной работы электродвигателя к статорным обмоткам предъявляют ряд требований, одним из которых является то, что активные и индуктивные сопротивления каждой из фаз должны быть одинаковыми. Это будет выполняться только в том случае, если каждая фазная обмотка будет абсолютно идентична двум другим, то есть должна быть выполнена проводом одного сечения, иметь одинаковое число витков и число параллельных ветвей, а также располагаться в одинаковых электромагнитных условиях. Только в этом случае в каждой фазе будет наводиться одинаковая по величине ЭДС  $E_\phi$ . В свою очередь  $E_\phi$  будет складываться из суммы ЭДС витков  $E_{1в}$ , приходящихся на фазу:

$$E_\phi = \sum E_{1в} \text{ или } E_\phi = E_{1в} W_\phi, \quad (2.34)$$

где  $W_\phi$  – количество витков в обмотке одной фазы, шт;

$E_{1в}$  – ЭДС одного витка.

Протекая по обмотке, ток  $I_{xx}$  создает на активном  $r$  и реактивном  $x$  сопротивлениях обмотки падение напряжения  $\Delta U = I_{xx}(a)r + I_{xx}(p)X$ .

Следовательно, приложенное к обмотке напряжение  $U_\phi$ , будет уравновешиваться ЭДС  $E_\phi$  и падением напряжения в обмотке  $\Delta U$ .

В векторной форме все вышесказанное отражено на упрощенной (рисунок 2.18, *a*) и фактической (рисунок 2.18, *б*) векторных диаграммах асинхронного двигателя.

Из выражения (2.34) получаем, что для определения  $W_\phi$  необходимо найти отношение ЭДС одной фазы  $E_\phi$  к ЭДС одного витка, приходящегося на фазу  $E_{1в}$ :

$$W_\phi = \frac{E_\phi}{E_{1в}}, \quad (2.35)$$

где  $E_{1в}$  – ЭДС одного витка обмотки, В.

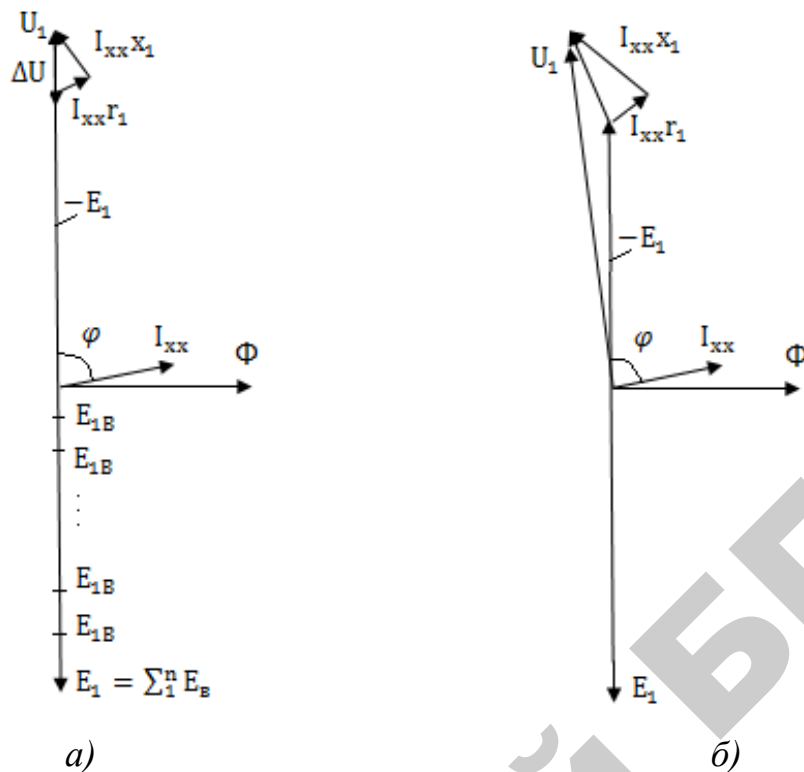


Рисунок 2.18 – Векторные диаграммы асинхронного двигателя в режиме холостого хода: *a* – упрощенная; *б* – фактическая

От величины приложенного напряжения  $U_{\phi}$  падение напряжения в обмотке составляет от 2,5–4,0 %. Если принять, что в среднем падение напряжения  $\Delta U$  составляет около 3 % от 100 %, то  $E_{\phi}$  через приложенное напряжение можно определить по выражению

$$E_{\phi} = 0,97U_{\phi}, \quad (2.36)$$

где  $E_{\phi}$  – ЭДС обмотки одной фазы, В;

$U_{\phi}$  – приложенное к обмотке фазное напряжение, В.

Подставляя в выражение (2.35) полученное выражение (2.36) вместо  $E_{\phi}$ , получаем, что число витков на фазу будет определяться следующим образом:

$$W_{\phi} = \frac{0,97U_{\phi}}{E_{1B}}. \quad (2.37)$$

Отсюда следует, что для определения числа витков на фазу необходимо понимать, что собой представляет ЭДС одного витка.

Из курса ТОЭ (теоретические основы электротехники) известно, что мгновенное значение ЭДС одного витка, согласно закону Фарадея, определяется из выражения

$$e_{1в} = -\frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.38)$$

где  $t$  – время, с.

Переменный магнитный поток изменяется по периодическому синусоидальному закону:

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t, \quad (2.39)$$

где  $\Phi_m$  – амплитудное значение магнитного потока, Вб;

$\omega$  – угловая частота вращения поля, рад/с.

Подставив уравнение (2.39) в (2.38) и проинтегрировав, получим

$$e_{1в} = -\omega\Phi_m \cos \omega t = \omega\Phi_m \sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right). \quad (2.40)$$

Максимальное значение ЭДС одного витка будет, когда  $\sin \left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = 1$ ,

то есть угол  $\left( \omega t - \frac{\pi}{2} \right) = 90^\circ$ , тогда:

$$E_{1в \max} = \omega\Phi_m. \quad (2.41)$$

Зная, что угловая частота  $\omega$  связана с частотой питающей сети  $f$  соотношением  $\omega = 2\pi f$  и, что действующая величина меньше амплитудной в  $\sqrt{2}$  раз, можно принять, что действующее значение ЭДС одного витка  $E_{1в}$  будет равно:

$$E_{1в} = \omega\Phi_m = 2\pi f\Phi_m = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f\Phi. \quad (2.42)$$

Ранее было указано, что у трехфазного асинхронного электродвигателя обмотка редко бывает сосредоточенной, чаще всего  $q > 1$ . При этом часть магнитного потока  $\Phi$  будет рассеивается, что учитывается коэффициентом распределения  $K_p$ , равным

$$K_p = \frac{\sin(\alpha q / 2)}{q \sin(\alpha / 2)}. \quad (2.43)$$

Кроме этого, если статорная обмотка выполняется с укорочением шага, это также повлияет на уменьшение магнитного потока. Уменьшение магнитного потока за счет укорочения шага характеризуется коэффициентом укорочения, который определяется по выражению

$$K_y = \sin \left( 90^\circ \frac{y}{y'} \right), \quad (2.44)$$

где  $y$  – укороченный шаг;

$y'$  – полный диаметральный шаг.

В общем, изменение магнитного потока, зависящее от того, сосредоточенная обмотка или нет, выполнена она с укорочением шага или без укорочения шага, определяется обмоточным коэффициентом  $K_{об}$ :

$$K_{об} = K_p K_y. \quad (2.45)$$

С учетом вышеприведенных рассуждений и выполненных математических преобразований, получаем расчетное выражение для ЭДС одного витка  $E_{1в}$ :

$$E_{1в} = 4,44 f \Phi K_{об}. \quad (2.46)$$

Если подставить полученное выражение (2.46) в формулу (2.37) для определения числа витков на одну фазу  $W_\phi$ , то получим

$$W_\phi = \frac{0,97 U_\phi}{4,44 f \Phi K_{об}}. \quad (2.47)$$

Анализируя эту формулу, можно сделать вывод: чтобы определить  $W_\phi$  необходимо знать, какую величину имеет магнитный поток, так как все остальные величины нам известны ( $U_\phi$  и  $f$  задаются заказчиком, а  $K_{об}$  известен по результатам расчета обмоточных данных).

Магнитный поток под полюсом распределяется неравномерно. Он имеет максимальное значение под центральной точкой полюса, а на границах полюсов его значение минимально. Поэтому при определении магнитного потока необходимо учитывать такой характер его изменения.

На рисунке 2.19 представлено реальное распределение магнитной индукции, а, следовательно, и магнитного потока под полюсом (полуокружность с радиусом  $B_\delta$ ) и вариант изменения магнитного потока в случае, если бы он имел равномерный характер распределения под полюсом (прямоугольник со сторонами  $\tau = 2B_\delta$  и  $B_{\delta \text{ ср}} = 1/2 B_\delta$ ).

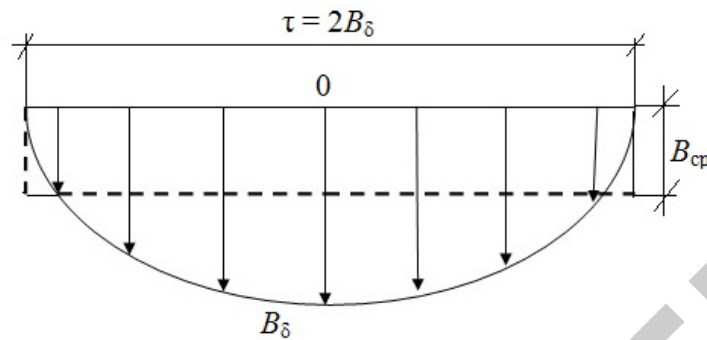


Рисунок 2.19 – Распределение магнитной индукции  $B_\delta$  под полюсом в воздушном зазоре

Возьмем отношение площади, характеризующей равномерное распределение магнитного потока (2.48) к площади, характеризующей реальное распределение магнитного потока (2.49):

$$S_{\text{пр}} = 2B_\delta \cdot \frac{1}{2}B_\delta = B_\delta^2, \quad (2.48)$$

$$S_{\frac{1}{2}\text{окр}} = \frac{\pi(2B_\delta)^2}{8} = \frac{\pi 4B_\delta^2}{8} = \frac{\pi B_\delta^2}{2}; \quad (2.49)$$

$$\frac{S_{\text{пр}}}{S_{\frac{1}{2}\text{окр}}} = \frac{B_\delta^2}{\frac{\pi B_\delta^2}{2}} = B_\delta^2 \cdot \frac{2}{\pi B_\delta^2} = \frac{2}{\pi}.$$

Полученный коэффициент  $\frac{2}{\pi}$  носит название *коэффициента неравномерности магнитного потока* и показывает, что среднее значение магнитной индукции будет равно:

$$B_{\text{ср}} = \frac{B_\delta}{\frac{\pi}{2}} = \frac{2}{\pi} B_\delta. \quad (2.50)$$

Зная площадь полюса в воздушном зазоре для магнитопровода рассчитываемой машины и величину магнитной индукции в воздушном зазоре, и с учетом



неравномерности распределения магнитного потока, его величину можно определить из выражения:

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_{\delta} Q_{\delta}, \quad (2.51)$$

где  $B_{\delta}$  – максимальное значение магнитной индукции в воздушном зазоре, Тл, берется из таблицы 2.5\*;

$Q_{\delta}$  – площадь полюса в воздушном зазоре, м<sup>2</sup>.

Таблица 2.5 – Нормированные электромагнитные нагрузки асинхронных двигателей

Наименование	Мощность, кВт		
	до 1	1–10	10–100
Индукция в воздушном зазоре $B_{\delta}$ , Тл	0,3–0,6	0,6–0,7	0,7–0,9
Индукция в зубцах статора $B_z$ , Тл	1,3–1,5	1,4–1,6	1,4–1,8
Индукция в спинке статора $B_c$ , Тл	1,1–1,5	1,2–1,6	1,3–1,6

\*Примечание. Для того, чтобы задаться магнитной индукцией в воздушном зазоре для дальнейшего расчета, необходимо знать, в какой диапазон по мощности вошел рассматриваемый электродвигатель. Для этого можно воспользоваться номограммой  $S_{дв} = f(D)$ , показанной на рисунке 2.20.

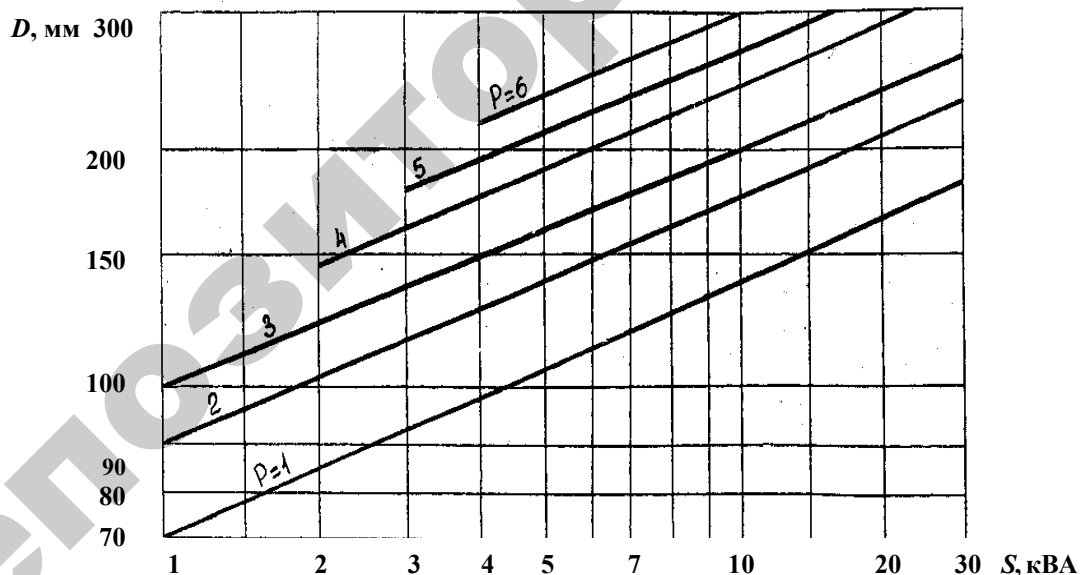


Рисунок 2.20 – Зависимость полной мощности асинхронного электродвигателя от внутреннего диаметра магнитопровода статора  $S_{дв} = f(D)$  при различных  $P$  (число пар полюсов)

Также при выборе величины магнитной индукции надо учитывать, что так как однослойные обмотки выполняются без укорочения шага, а, следовательно, не происходит подавления высших гармонических составляющих, это вызывает

дополнительный нагрев в машине и потери по мощности, то для электрической машины с однослойной обмоткой магнитные индукции на всех участках магнитной цепи берутся ближе к нижнему пределу, для двухслойных – к большему.

Кроме этого, надо учитывать и условия, в которых будет эксплуатироваться перерасчитываемая машина. Так если асинхронный двигатель работает в помещениях с постоянной повышенной температурой, то следует брать магнитные индукции  $B_\delta$ ,  $B_z$ ,  $B_c$  ближе к нижнему пределу.

Величину магнитного потока, определенного по формуле (2.51), как правило, необходимо уточнять, так как не всегда полученное по формуле (2.47) число витков на фазу  $W_\phi$  является целым числом или полученный результат не дает возможности уложить витки таким образом, при котором они должны быть разложены равномерно по секциям фазных катушек. В этом случае обмотка невыполнима, так как с одной стороны, часть витка в пазы уложить нельзя, а с другой, секции в ней получаются с разным числом витков. Получение же нужной величины магнитного потока возможно, так как допустимые пределы магнитной индукции в воздушном зазоре  $B_\delta$  (таблица 2.5) позволяют взять ее такой, при которой обмотка будет *равносекционной*, то есть с одинаковым числом витков в каждой секции.

Условие равносекционности обмотки вытекает из выражения числа активных проводников в одном пазу, шт.:

$$N_{\text{п}} = \frac{2W_\phi ma}{z}, \quad (2.52)$$

где  $a$  – число параллельных ветвей, шт.

Так как один виток имеет два активных проводника, то произведение  $2W_\phi ma$  представляет собой полное число активных проводников в обмотке асинхронного электродвигателя. Из выражения (2.52) можно сделать следующий вывод: чтобы число витков в секциях обмотки было *одинаковым*, необходимо число активных проводников в пазу  $N_{\text{п}}$  *округлить*. Для однослойной обмотки полученное число  $N_{\text{п}}$  по правилам математического округления округляют до ближайшего целого числа, а в двухслойных обмотках – до ближайшего целого и четного.

После округления  $N_{\text{п}}$  выполняется уточнение числа витков в фазе  $W_\phi''$  по формуле

$$W_\phi'' = \frac{N_{\text{п}} z}{2ma}, \text{ шт.} \quad (2.53)$$

Полученная равносекционная обмотка с уточненным числом витков на фазу  $W_{\phi}''$  должна полностью использовать магнитную систему двигателя по магнитной нагрузке на всех участках ее цепи. В первую очередь, должны строго входить в нормы величины  $B_z$  и  $B_c$ , приведенные в таблице 2.5. Дело в том, что электротехническая сталь обладает насыщением. Поэтому расчетное повышение магнитных нагрузок  $B_z$ ,  $B_c$  сверх рекомендованных не приведет к их фактическому значительному увеличению. Резко возрастет лишь ток холостого хода  $I_{xx}$  (зависимость  $B = f(H)$ , рисунок 2.21), причем он может оказаться значительно больше номинального. Следовательно, завышение величин  $B$  и  $I_{xx}$  увеличит только нагрев стали сердечника (так как  $\Delta P_{xx} \equiv B^2$ ) и вызовет перегрев обмотки (так как  $P_{кз} \equiv I^2$ ). Занижение величин  $B$ ,  $T_l$  приведет и к снижению магнитного потока  $\Phi$ , а это в итоге снизит мощность машины.

Магнитные индукции напрямую зависят от величины магнитного потока  $\Phi$ , который при округлении до  $W_{\phi}''$  изменится:

$$\Phi'' = \frac{0,97U_{\phi}}{4,44f K_{об}W_{\phi}''}, \text{ Вб.} \quad (2.54)$$

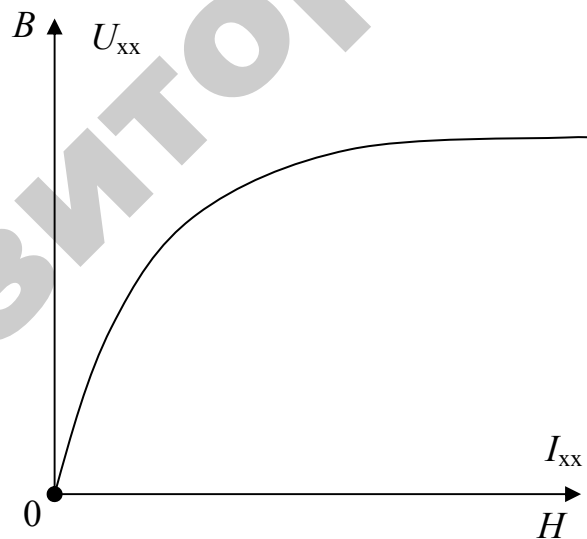


Рисунок 2.21 – Зависимость  $B = f(H)$

Так как поток  $\Phi''$  в магнитной системе электромашин на всех участках неизменный ( $\Phi \rightarrow \text{const}$ ), то значения  $B_{\delta}$ ,  $B_z$ ,  $B_c$  (плотности магнитного потока) зависят от площадей участков магнитной цепи: в воздушном зазоре –  $Q_{\delta}$ , в зубцовой зоне –  $Q_z$ , в спинке статора –  $Q_c$ , то есть

$$B_{\delta} = \frac{\Phi''}{\frac{2}{\pi} Q_{\delta}}, \quad (2.55)$$

$$B_z = \frac{\Phi''}{\frac{2}{\pi} Q_z} = B_z \frac{Q_{\delta}}{Q_z}, \quad (2.56)$$

$$B_c = \frac{\Phi}{2Q_c} = B_{\delta} \frac{2}{\pi} \frac{Q_{\delta}}{2Q_c}. \quad (2.57)$$

В зубцовой зоне магнитопровода асинхронного электродвигателя распределение магнитной индукции  $B_z$  практически остается таким же, как в воздушном зазоре, поэтому коэффициент  $\frac{2}{\pi}$  в выражении (2.56) сохраняется, как и при определении  $B_{\delta}$ .

В формуле расчета  $B_c$  (2.57) принимается во внимание, что магнитный поток  $\Phi''$  в спинке статора распределяется по всей площади равномерно и, выходя на спинку статора магнитопровода, полученный в обмотке поток распределяется равномерно на две стороны спинки статора (рисунок 2.22, поэтому в знаменателе формулы появилась двойка).

Далее полученные магнитные нагрузки  $B_z$  и  $B_c$  необходимо сравнить с допустимыми. Они должны быть в пределах величин, приведенных в таблице 2.5.

Если магнитная нагрузка на каком-либо участке магнитной цепи (в электротехнической стали) выше нормы, необходимо повторить расчет, начиная с формулы  $W_{\phi}''$  (2.53), увеличив число проводников в пазу  $N_{\text{п}}$ ; если ниже – необходимо уменьшить число проводников в пазу. Тем самым соответственно уменьшается или увеличивается магнитный поток  $\Phi''$ .

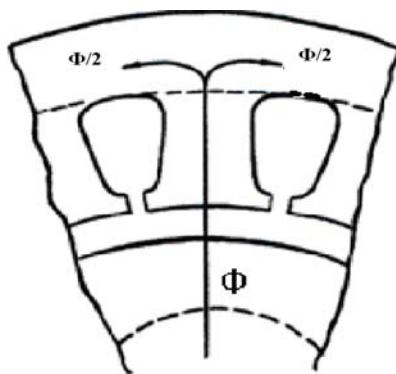


Рисунок 2.22 – Распределение магнитного потока в спинке статора

Однако даже если на всех участках магнитной цепи индукции вошли в пределы установленных норм, это еще не значит, что расчет может быть окончен. Рассчитываемый двигатель должен иметь *оптимальные параметры*, то есть из его магнитопровода должна быть «выжата» максимально-возможная мощность. Естественно, при этом  $B_\delta$ ,  $B_z$ ,  $B_c$  должны иметь наибольшие значения из приведенных в таблице 2.5 норм с учетом состояния электротехнической стали (при новой –  $B_\delta$ ,  $B_z$ ,  $B_c$  берутся ближе к большему пределу и наоборот). Вот почему, выполняя цель по нахождению оптимального варианта расчета, меняют  $N_{\text{п}}$  и делают несколько вариантов расчета магнитных нагрузок.

Для наглядности проводимого подбора рационального числа витков в обмотке одной фазы асинхронного двигателя результаты всех расчетов  $W_\phi$  обычно сводятся в таблицу (например, по форме таблицы 2.6).

Также надо учитывать, что при перерасчете электродвигателя на другую синхронную частоту вращения магнитного поля статора нарушается согласование площадей участков магнитной цепи  $Q_\delta$ ,  $Q_z$ ,  $Q_c$ . Поэтому магнитная индукция одного из участков в стали ( $B_z$  или  $B_c$ ) может оказаться меньше нормы, тогда как другая – в норме. Однако если увеличить магнитную индукцию в первом участке, во втором она увеличится уже сверх нормы. Такое превышение вызывает перегрев стали, ускоренное старение изоляции и выход машины из строя (она просто «сгорит»).

Таблица 2.6 – Нагрузка магнитной цепи при числе витков  $W''_\phi$

Наименование величин	Расчетная формула	Варианты расчета			Допустимые пределы
		1	2	3	
Число проводников в пазу $N_{\text{п}}$ , шт.	$N_{\text{п}} = \frac{2W''_\phi m a}{z}$				
Число витков в обмотке одной фазы $W_\phi''$ , шт.	$W_\phi'' = \frac{N_{\text{п}} z}{2 m a}$				
Величина магнитного потока при $W_\phi''$ , Вб	$\Phi = \frac{0,97 U_\phi}{4,44 f K_{\text{об}} W_\phi''}$				
Индукция в воздушном зазоре $B_\delta$ , Тл	$B_\delta = \frac{\pi \Phi}{2 Q_\delta}$				см. табл. 2.5
Индукция в зубцовой зоне $B_z$ , Тл	$B_z = \frac{\Phi}{\frac{2}{\pi} \cdot Q_z}$				см. табл. 2.5
Индукция в спинке статора $B_c$ , Тл	$B_c = \frac{\Phi}{2 Q_c}$				см. табл. 2.5

Поэтому, несмотря на то, что один из участков магнитной цепи оказывается недогруженным, а, следовательно, будет иметь место некоторое занижение мощности асинхронного двигателя, рациональным числом витков  $W_{\phi}$  принимается то, при котором ни  $B_z$ , ни  $B_c$  не выходят за пределы норм.

Кроме того, надо добавить, что при *изменении частоты вращения* у асинхронного двигателя после ремонта может иметь место: «прилипание» – ротор не проворачивается при включении машины в сеть; «застревание» – ротор вращается на значительно пониженных оборотах; «повышенный шум».

Причины кроются в содержании высших гармонических составляющих в магнитном потоке электромашины, а это связано с нарушением соотношения между числами зубцов магнитопровода статора  $z_1$  и ротора  $z_2$ . Вот почему при такой модернизации асинхронного двигателя обязательно проводится проверка ее допустимости:

– во избежание «прилипания» необходимо, чтобы:

$$\begin{aligned} z_2 &\neq z_1; z_2 \neq 0,5z_1; z_2 \neq 2z_1. \\ z_2 &\neq 2p(3i+1); z_2 \neq 2p3i, \end{aligned} \quad (2.58)$$

где  $i$  – любое целое число;

$p$  – число пар полюсов;

– во избежание *застревания ротора при пуске* необходимо, чтобы:

$$\begin{aligned} z_2 &\neq z_1+p, \quad z_2 \neq z_1+2p, \\ z_2 &\neq 0,5z_1+p, \quad z_2 \neq 2z_1+2p; \end{aligned} \quad (2.59)$$

– для предупреждения появления *повышенного шума* во время работы электродвигателя необходимо, чтобы:

$$\begin{aligned} z_2 &\neq 2p \cdot 3i \pm 1, \\ z_2 &\neq 2p \cdot 3i \pm (2p+1). \end{aligned} \quad (2.60)$$

### 2.5.2 Упрощенное определение числа активных проводников в одном пазу $N_{\Pi}$

Такой расчет предусматривает сокращение вычислений и подбора рационального числа витков  $W_{\phi}$ .

Если в выражение для определения числа активных проводников в одном пазу  $N_{\text{п}}$  (2.52) вместо  $W_{\Phi}$  подставить выражение (2.47), то число активных проводников в одном пазу будет выражаться формулой (2.61):

$$N_{\text{п}} = \frac{2m a 0,97 U_{\Phi}}{4,44 f \Phi K_{\text{об}} z}. \quad (2.61)$$

Если принять, что  $f = 50$  Гц, коэффициент  $K_{\text{об}} \approx 0,97$ ,  $m = 3$ , то с допустимыми округлениями формула (2.61) принимает вид:

$$N_{\text{п}} = \frac{a U_{\Phi}}{37 \Phi z}. \quad (2.62)$$

В полученном выражении неизвестен только магнитный поток  $\Phi$ . Его можно определить по известным допустимым величинам магнитной индукции (таблица 2.5), или в зубцовой зоне  $B_z$  по формуле (2.63), или в спинке статора  $B_c$  по формуле (2.64), так как  $\Phi$  на всех участках магнитной цепи неизменен. Тогда

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_z Q_z \quad (2.63)$$

или

$$\Phi = 2 B_c Q_c. \quad (2.64)$$

Следует учитывать, что если магнитопровод рассчитываемой электромашинны был выполнен для числа полюсов, несоответствующего запроектированной частоте вращения (то есть  $n_{\text{н}}$  изменена), между площадями магнитной цепи  $Q_{\delta}$ ,  $Q_c$  и  $Q_z$ , как уже говорилось выше, нарушается согласование. В этом случае формула расчета магнитного потока  $\Phi$  зависит от соотношения площадей  $Q_z$  и  $Q_c$ . Причем, если

$$\frac{2Q_c}{Q_z} \geq 1,15. \quad (2.65)$$

то есть  $n_3 < n_{\text{н}}$  (где  $n_3$  – заданная заказчиком частота вращения поля),  $\Phi$  следует определять только по магнитной индукции в зубцовой зоне  $B_z$  (2.63), если менее 0,75 ( $n_3 > n_{\text{н}}$ ), то рассчитывать  $\Phi$  можно только по магнитной индукции в спинке статора  $B_c$  (2.64).

Полученную из формулы (2.62) величину числа активных проводников в пазу  $N_{\text{п}}$  подставляют в выражение (2.53) и находят число витков в обмотке одной фазы  $W_{\text{ф}}''$ . При этом, в случае сомнения, можно вновь определить уточненный магнитный поток  $\Phi$  (2.54) и индукции: в зубцовой зоне  $B_z$  (2.56), а также в спинке статора  $B_c$  (2.57), – затем сравнить полученные результаты с допустимыми величинами в таблице 2.5.

### 2.5.3 Число витков в секции обмотки

В однослойной обмотке активные проводники  $N_{\text{п}}$  одной секции полностью занимают паз, поэтому число витков  $W_{\text{сек}}^{(1)}$  в ней равно числу этих проводников в пазу:

$$W_{\text{сек}}^{(1)} = N_{\text{п}}. \quad (2.66)$$

В двухслойной обмотке в одном пазу лежат активные проводники двух секций, следовательно, число витков в секции ( $W_{\text{сек}}^{(2)}$ ) равно половине числа активных проводников в пазу:

$$W_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N_{\text{п}}}{2}. \quad (2.67)$$

## 2.6 Выбор изоляции паза и лобовых частей обмотки

Электрическая изоляция обмотки является одним из важнейших элементов электрической машины, от которой в значительной степени зависит, во-первых, *надежность в эксплуатации*. Поэтому при выборе марки и толщины электроизоляционных материалов, кроме номинальных параметров необходимо учитывать комплекс факторов, сопровождающих работу электродвигателя. Это нагрузка машины, режим и условия ее работы, температура и чистота окружающей среды.

Во-вторых, выбор электроизоляционных материалов немаловажно *влияет на конструктивные параметры машины*, например на ее габариты и вес.

В-третьих, выбранные электроизоляционные материалы *входят в общую стоимость* электрической машины, то есть выбор определенной марки материалов должен подтверждаться технико-экономическим обоснованием.

Изоляция должна обеспечивать при соответствующей нагревостойкости требуемую электрическую стойкость между обмотками разных фаз и магнитопроводом, а также между собой. Также изоляция должна обладать химической стойкостью, влагостойкостью и механической прочностью.



Изоляционные материалы, применяемые в обмотках электрических машин и трансформаторов, разделяют на пять классов нагревостойкости, отличающихся друг от друга предельно допустимой температурой нагрева (таблица 2.7).

Класс изоляции определяет также значение расчетной рабочей температуры при расчете активного сопротивления обмотки.

Таблица 2.7 – Предельно допустимые температуры нагрева для классов нагревостойкости *A, E, B, F, H*

Класс нагревостойкости изоляции	<i>A</i>	<i>E</i>	<i>B</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
Предельно допустимая температура нагрева изоляции, °С	105	120	130	155	180
Предельно допустимая температура нагрева обмоток, °С	100	110	120	140	165
Предельно допустимые превышения температуры обмоток (°С) при $T_{\text{охл. ср.}} = 40$ °С	60	70	80	100	125
Рабочая расчетная температура обмотки при расчете ее сопротивления, °С	75	75	75	115	115

Приведем примерный перечень электроизоляционных материалов в зависимости от класса нагревостойкости.

К классу *A* относятся материалы, пропитанные изоляционным составом или погруженные в жидкие диэлектрики (натуральные смолы, масляные, асфальтовые, эфирцеллюлозные лаки, трансформаторное масло, термопластичные компаунды); лакоткани, изоляционные ленты, лакобумаги, электрокартон, гетинакс, текстолит, пропитанное дерево, древесные слоистые пластики, некоторые синтетические пленки, изоляция проводов (ПБД, ПЭВЛО, ПЭЛШО и др.) из хлопчатобумажной ткани, шелка и лавсана, эмалевая изоляция проводов (ПЭЛ, ПЭМ, ПЭЛР и ПЭВД и др.).

К классу *E* относятся синтетические пленки и волокна, некоторые лакоткани на основе синтетических лаков, терморезистивные синтетические смолы и компаунды (эпоксидные, полиэфирные, полиуретановые, изоляция проводов типов ПЛД, ПЭПЛО из лавсана, эмалевая изоляция проводов типов ПЭВТЛ, ПЭТВ и др. на основе полиуретановых и полиамидных смол).

В группу материалов, относящихся к классу *B* входят материалы на основе неорганических диэлектриков (слюда, асбест, стекловолокно) и клеящих, пропиточных и покровных лаков и смол повышенной нагревостойкости органического происхождения с содержанием органических веществ по массе не более 50 %. К этому классу также относятся материалы на основе щипаной слюды: миканит, микалента, микафоллий; различные синтетические материалы: полиэфирные смолы на основе фталевого ангидрида, фторопласт-3, некоторые полиуретановые смолы, пластмассы

с неорганическим наполнителем, пленкостеклопласт «Изофлекс»; термореактивные синтетические компаунды; эмалевая изоляция проводов типов ПЭТВ, ПЭТВП и др. на основе полиэфирных лаков и термопластических смол. Пропитывающими составами служат битумно-масляно-смоляные лаки на основе природных и синтетических смол.

К группе материалов класса *F* относятся материалы, указанные в классе *B*, из слюды, стекловолокна, асбеста, но без подложки или с неорганической подложкой; пленкостеклопласт «Имидофлекс», стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов типов ПСД, ПСДТ, а также эмалевая изоляция проводов типов ПЭТ-155, ПЭТП-155 на основе капрона. Пропитывающими составами служат термостойкие синтетические лаки и смолы. Изоляция этого класса не должна содержать бумаги, целлюлозы и шелка.

В класс *H* входят те же материалы, что и в класс *B*, из слюды, стекловолокна и асбеста без подложки или с неорганической подложкой, кремнийорганические эластомеры, стекловолокнистая и асбестовая изоляция проводов типов ПСДК, ПСДКТ, эмалевая изоляция проводов типов ПЭТ-200, ПЭТП-200 и др. на основе кремнийорганических лаков; пропитывающими составами служат кремнийорганические лаки и смолы.

Пазовая часть обмотки (рисунок 2.23) изолирована коробами *1* из пленкослюдопласта или из двух слоев различных материалов, например пленкосинтокартона и электронита. Также пазовый короб может состоять из трех слоев диэлектриков:

– *первый слой*, укладываемый на дно паза, предназначен для защиты второго слоя от повреждения листами электротехнической стали, то есть назначение этого слоя – обеспечение требуемой механической прочности (материалы – слюденил, электрокартон, пленкосинтокартон и др.);

– *второй слой* по назначению является основной электрической изоляцией, поэтому материалы, выбираемые для данного слоя, должны обладать высокой электрической прочностью (лакоткани, различные композиционные материалы в виде гибких электроизоляционных пленок и т. д.);

– *третий слой* по своему назначению служит защитой второго слоя от повреждений активными проводниками, помещаемыми в паз, то есть обеспечение требуемой механической прочности (материалы: электрокартон, пленкосинтокартон, кабельная бумага и др.).

В двухслойных обмотках между верхним и нижним слоями устанавливают изоляционную прокладку *2*, имеющую несколько большую ширину, чем паз. Отогнутые вниз края прокладки предохраняют от возможного проскальзывания проводников одного слоя в другой.

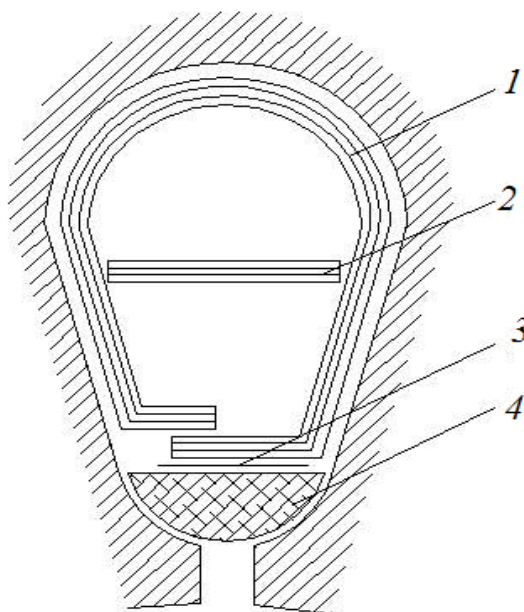


Рисунок 2.23 – Пазовая изоляция обмотки: 1 – пазовый короб; 2 – межслоевая изоляционная прокладка; 3 – прокладка под клин; 4 – пазовый клин

На дно пазов большинства машин с двухслойной обмоткой устанавливают дополнительные прокладки с целью предохранить материал пазовых коробов от возможных повреждений при уплотнении проводников во время укладки о неровности дна паза, которые возникают из-за технологических допусков при штамповке и шихтовке сердечников.

Активные проводники обмотки закрепляют в пазах клиньями 4 из текстолита или из дерева твердых пород. Под клин устанавливают прокладки 3 из механически прочного изоляционного материала, препятствующие повреждению краев пазового короба при заклинивании пазов. Вместо клиньев обмотка может быть закреплена пазовыми крышками, которые изготавливают также из механически прочного изоляционного материала. Пазовые крышки устанавливают на обмоточных станках одновременно с втягиванием катушек при механической отдельной намотке или на станках для заклиновки после намотки совмещенным методом. После пропитки обмотки лаком пазовые крышки приобретают достаточную прочность и жесткость для надежного закрепления проводников и в то же время занимают меньший объем паза по сравнению с клиньями, что способствует лучшему заполнению его проводниками обмотки. При укладке сыпной обмотки круглые проводники не имеют заранее определенного места в пазу и размещаются в нем произвольно. Поэтому в обмотке специальная витковая изоляция отсутствует. Ее функцию выполняет изоляция обмоточного провода, то есть проводниковая изоляция. Обмотку из круглого провода применяют в машинах небольшой мощности, имеющих малые габариты и большое число витков, напряжение между витками

обмотки которых, как правило, не превышает нескольких вольт. Электрической прочности проводниковой изоляции в таких обмотках оказывается достаточно для обеспечения надежной работы машины.

Междуфазовой изоляцией в пазовой части двухслойных обмоток являются прокладки между слоями. Лобовые части обмотки не имеют корпусной изоляции, а междуфазовая изоляция устанавливается между катушечными группами в виде фигурных прокладок, вырезанных из листового материала по форме лобовых частей уложенной и отформованной обмотки.

Внутримашинные соединения и выходные концы обмоток выполняют электроизоляционными трубками.

Для механической защиты и закрепления изоляции используют хлопчатобумажные, стеклянные и лавсановые ленты.

Для увязки и бандажировки обмоток статора в лобовых частях используют хлопчатобумажные (класс *A*) и стеклянные (классы *B, F, H*) шнур-чулки.

В современных электрических машинах получили широкое применение композиционные электроизоляционные материалы. Такой материал представляет собой сочетание полимерных пленок с различными гибкими изоляционными материалами на основе синтетических волокон. Указанные компоненты соединяют между собой клеящими составами. Функции компонентов различны: пленка принимает на себя электрическую и механическую нагрузки, а волокнистые материалы придают композиции необходимые технологические свойства: эластичность, упругость, надежную связь между поверхностью пазовой изоляции и прилегающими к ней поверхностью катушек с одной стороны и поверхностью магнитопровода, с другой. Непременным условием при подборе компонентов является их полная совместимость.

Способ изоляции паза и применяемые изоляционные материалы зависят от типа обмотки, ее рабочего напряжения и температуры перегрева. При выборе электроизоляционных материалов для изоляции паза необходимо, чтобы все материалы имели **одинаковую нагревостойкость**. Итогом выбора электроизоляционных материалов является их проверка на электрическую прочность. В частности для пазовой изоляции, состоящей из нескольких слоев диэлектриков, проводят проверку на суммарную электрическую прочность по формуле:

$$\sum_{i=1}^n E_{\text{пр}} = E_{1\text{сл}} + \dots + E_{n\text{сл}}, \quad (2.68)$$

где  $E_{1\text{сл}}$  — электрическая прочность диэлектрического материала 1 слоя, кВ/мм, (2.69);

$E_{n\text{сл}}$  — электрическая прочность диэлектрического материала  $n$ -го слоя, кВ/мм;

$$E_{i_{\text{сл}}} = E_{\text{пр}i} \delta_i, \quad (2.69)$$

где  $E_{\text{пр}i}$  – электрическая прочность материала  $i$ -го слоя, кВ/мм;

$\delta_i$  – толщина материала  $i$ -го слоя, мм.

Полученное значение суммарной электрической прочности, составляющих пазовую изоляцию, необходимо сравнить с испытательным напряжением ( $U_{\text{исп}}$ ) для данной машины. Проверка проводится по условию (2.70):

$$\sum E_{\text{пр}} > U_{\text{исп}}. \quad (2.70)$$

Нормы испытательного напряжения для асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, в зависимости от номинала по мощности и напряжения, приведены в ТКП 339–2011 (02230), п. 4.4.5.3 «Испытание повышенным напряжением частотой 50 Гц», табл. 4.4.12.

## 2.7 Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода

Обмоточные провода, используемые при производстве и ремонте обмоток электрических машин, могут быть в зависимости от материала токоведущей жилы медные ( $Cu$ ) или алюминиевые ( $Al$ ), круглого или прямоугольного сечения. Обмоточные провода для обмоток электрических машин изготавливаются с *волокнистой*, *эмалевой* или *комбинированной* изоляцией.

Материалы, используемые для волокнистой изоляции:

- бумага (кабельная или телефонная);
- хлопчатобумажная пряжа;
- натуральный и искусственный шелк (капрон, лавсан);
- асбестовые и стеклянные волокна.

Эти материалы могут накладываться в один, два или несколько слоев в виде оплетки (чулка).

Основными материалами для эмалевой изоляции являются:

- эмаль на поливинилацеталевой основе (винифлекс);
- эмаль на полиамиднорезольном лаке;
- эмаль на лаке металвин;
- эмаль на основе терефталевой кислоты;
- кремнийорганическая эмаль.

Обозначение всех марок обмоточных проводов начинается с буквы П – провод. Если следующая буква в маркировке провода стоит А, то это указывает

на алюминиевую токоведущую жилу. Отсутствие буквы А говорит о том, что токоведущая жила изготовлена из меди.

*Волокнистая изоляция* провода имеет следующие обозначения:

Б – хлопчатобумажная пряжа;

Ш – натуральный шелк;

ШК или К – искусственный шелк (капрон);

С – стекловолокно;

А – асбестовое волокно.

*Эмалевая изоляция* провода имеет следующие обозначения:

ЭЛ – эмаль лакостойкая;

ЭВ – эмаль высокопрочная (винифлекс);

ЭТ – эмаль теплостойкая полиэфирная;

ЭВТЛ – эмаль полиуретановая;

ЭЛР – эмаль полиамиднорезольная.

Наличие буквы О (Д) указывает на один (два) слоя изоляции. Наличие в конце маркировки цифры, указывает: 1 – нормальная толщина изоляции; 2 – усиленная толщина.

Марки обмоточных проводов, изолированных стекловолокном и пропитанных в теплостойком лаке, имеют в своем обозначении букву К, например ПСДК.

Выбор марки провода, применяемого при ремонте обмоток электрических машин, определяется требуемым классом нагревостойкости, номинальной мощности и напряжения, допустимой толщиной изоляции (определяется коэффициентом заполнения паза или располагаемыми габаритами для размещения обмоток), а также требованиями в части влагостойкости, морозостойкости, химостойкости и механической прочности изоляции.

Эмалевая изоляция на обмоточных проводах имеет наименьшую толщину, поэтому провода, имеющие такую изоляцию, рекомендуется применять при высоком коэффициенте заполнения паза. В этом случае гладкая поверхность проводов обеспечивает легкость их укладки в пазы, а малая толщина изоляции не позволяет обмотке перегреваться, несмотря на относительно высокую теплопроводность.

Применение проводов с эмалевой изоляцией обязательно должно быть увязано с видами лаков и разбавителей, которые используются на данном электроремонтном предприятии или которыми оно может обеспечить; некоторые лаки и разбавители оказывают разрушающее действие на эмалевую изоляцию проводов. Также надо учитывать, что при температуре 160–170 °С эмалевая изоляция становится термопластичной, следовательно, провода с такой изоляцией не могут применяться для обмоток, имеющих большую окружную скорость вращения.

Наибольшую толщину изоляции имеют обмоточные провода с волокнистой и комбинированной изоляцией. Не рекомендуется использовать такие провода для обмоток электрических машин, работающих в условиях повышенной влажности и агрессивных средах. В таких условиях лучше применять провода, имеющие стеклянную изоляцию. Однако, у такой изоляции имеется существенный недостаток – низкая механическая прочность.

К готовой изоляции предъявляются следующие требования:

- слой изоляции на проводе должен иметь одинаковую толщину;
- оплетка должна быть наложена на провод плотными рядами, без ребристости, просветов и утолщений (в редких случаях в отдельных точках допускаются наплывы эмали или утолщения оплетки в пределах допусков, установленных для каждой марки размера провода).

При выборе марки обмоточного провода следует учитывать, что цена провода одного и того же размера зависит от его марки; для электрических машин низкого напряжения стоимость провода является наиболее высокой слагающей в общей стоимости ремонта. Поэтому при выборе марки провода необходимо учитывать не только техническую, но и экономическую сторону.

### 2.7.1 Расчет сечения обмоточного провода

После выбора марки выполняется расчет параметров обмоточного провода.

Расчетное сечение провода без изоляции определяется по формуле, мм<sup>2</sup>:

$$\Pi'_p = \frac{Q_{\Pi} \cdot K_M}{N_{\Pi}}, \quad (2.71)$$

где  $K_M$  – коэффициент заполнения паза медью (таблица 2.8).

Также можно определять расчетное сечение провода с изоляцией по выражению

$$\Pi'_p = \frac{Q_{\Pi} \cdot K_3}{N_{\Pi}},$$

где  $K_3$  – коэффициент заполнения паза изолированными проводниками,  $K_3$  принимают равным от 0,68 до 0,72.

Отсюда  $Q_{\Pi} \cdot K_3$  – это активная площадь паза, то есть та площадь, которая занята в пазу непосредственно изолированными активными проводниками обмотки.

Естественно, что ее стремятся получить как можно больше. Вместе с тем при выборе  $K_3$  следует помнить: если взять его больше, чем допускает изоляция паза, то возникнут трудности с укладкой секции в пазы, если меньше – это потребует занижения сечения обмоточного провода и снизит мощность двигателя.

Рекомендуемые средние значения коэффициентов заполнения паза медью даны в таблице 2.8.

Таблица 2.8 – Коэффициенты заполнения паза медью

Обмотка	$K_M$ при мощности двигателя, кВт		
	до 1	1–10	10–100
Однослойная	0,40–0,44	0,44–0,48	0,51–0,52
Двухслойная	0,35–0,39	0,38–0,42	0,48–0,52

Меньшие значения заполнения паза берутся для меньшей мощности двигателя и пазовой изоляции на основе толстых диэлектриков, большие – при большей мощности машины и изоляции с использованием тонких диэлектриков.

По сечению провода, исходя из известного выражения площади окружности, определяется расчетный диаметр провода без изоляции, мм<sup>2</sup>:

$$d_p' = \sqrt{\frac{4\Pi_p'}{\pi}}. \quad (2.72)$$

По расчетным  $\Pi_p'$  и  $d_p'$  в таблицах ГОСТ или справочников (для примера см. приложение 7, таблицы 14–15) выбирается обмоточный провод стандартного сечения без изоляции ( $\Pi_{p \text{ ГОСТ}}$ ), его диаметры: с изоляцией ( $d_{\text{из ГОСТ}}$ ) и без ( $d'_{\text{без из ГОСТ}}$ ). При этом следует не забыть, что  $d_{\text{из ГОСТ}}$  определяется толщиной изоляции на проводе, а она зависит от марки и сечения, а также от того, что диаметр изолированного провода должен быть на 1,5–2 мм меньше ширины шлица паза ( $b_{\text{ш}}$ ):

$$d_{\text{ГОСТ}} < b_{\text{ш}} - (1,5...2,0). \quad (2.73)$$

В тех случаях, когда диаметр изолированного провода не отвечает поставленному условию, необходимо разделить расчетное сечение  $\Pi_p'$  на два, три и т. д. провода с одинаковыми площадями (так называемые параллельные сечения), но в общем случае их не должно быть более 4-х.

Расчетный диаметр провода с изоляцией и с учетом параллельных сечений, мм<sup>2</sup>:



$$d_p' = \sqrt{\frac{4\Pi_p'}{\pi a'}}, \quad (2.74)$$

где  $a'$  – число параллельных сечений.

Вновь по  $d$  выбирается в таблицах ГОСТ или справочниках стандартный диаметр провода для выбранной марки: с изоляцией  $d_{\text{ГОСТ}}$  и диаметр провода без изоляции  $d'_{\text{ГОСТ}}$ , мм.

Если провод удовлетворяет заданному условию, определяют стандартное сечение провода без изоляции и изолированного:

$$\Pi'_{\text{ГОСТ}} = \frac{(d'_{\text{ГОСТ}})^2 \pi}{4}, \text{ мм}^2.$$

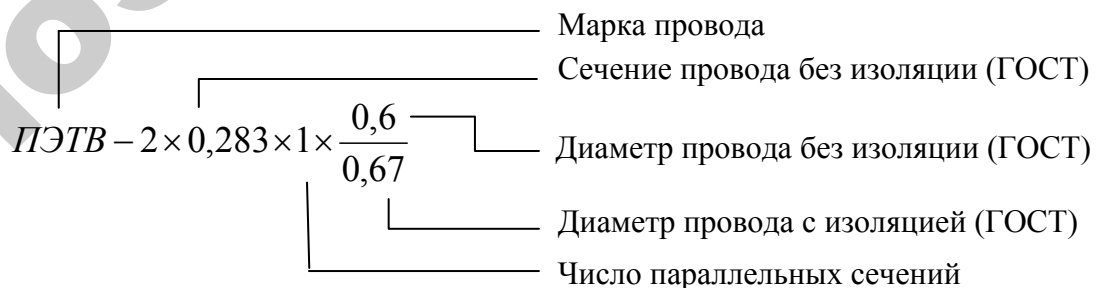
$$\Pi_{\text{ГОСТ}} = \frac{(d_{\text{ГОСТ}})^2 \pi}{4}, \text{ мм}^2.$$

Если число параллельных сечений уже равно четырем, а диаметр провода не отвечает ширине шлица паза, уменьшенного на  $1,5 \times 2$  мм, по возможности увеличивается число параллельных ветвей ( $a$ ). Для этого делается повторный перерасчет. Однако если и в этом случае  $d$  не отвечает ширине шлица паза, то число  $a$  допускается увеличить до 6.

Фактический коэффициент заполнения паза:

$$K_3 = \frac{\Pi_{\text{ГОСТ}} N_{\text{п}}}{Q_{\text{п}}}, \quad (2.75)$$

Пример выполнения обмотки двигателя проводом:



### 2.7.2 Расчет размеров секций (длина витка)

Определение длины витка необходимо для установки шаблона при изготовлении секций катушечных групп, а также для последующих расчетов: массы обмоточного провода, определения сопротивления постоянному току и пр.

Виток состоит из 2-х активных и 2-х лобовых частей, следовательно, средняя длина витка:

$$l_{\text{в}} = 2(l_{\text{а}} + l_{\text{л}}), \quad (2.76)$$

где  $l_{\text{а}}$  – пазовая (активная) длина витка, м;

$l_{\text{л}}$  – длина лобовой части витка, м.

При отсутствии дополнительных каналов на охлаждение в магнитопроводе  $l_{\text{а}} = l$ , м.

Длина лобовой части витка обмотки определяется из формулы, м:

$$l_{\text{л}} = kT + l', \quad (2.77)$$

где  $k$  – поправочный коэффициент;

$T$  – средняя ширина секции, м;

$l'$  – коэффициент запаса, м.

Коэффициенты поправочный и запаса зависят от метода изготовления обмотки и количества полюсов асинхронного двигателя (таблица 2.9).

Таблица 2.9 – Значения поправочного коэффициента и коэффициента запаса

2P	Сердечник статора, намотанный			
	отдельно		непосредственно в корпусе	
	$k$	$l', \text{ м}$	$k$	$l', \text{ м}$
2	1,25	0,02	1,30	0,03
4	1,30	0,02	1,35	0,03
6	1,40	0,02	1,50	0,03
8	1,50	0,02	1,55	0,03

Приведенные в таблице 2.9 величины  $k$  и  $l'$  используются при расчете длины лобовой части двухслойных обмоток с укороченным шагом; для однослойных петлевых обмоток  $k$  и  $l'$  берутся на 10–15 % больше, чем для двухслойных обмоток, а для однослойных концентрических – больше на 20–23 %.

Средняя ширина секции (под ней понимается длина дуги окружности, центр которой лежит на оси вращения ротора машины, ограниченная активными сторонами одной и той же секции) определяется по формуле (2.77), м:

$$T = \frac{\pi(D + h)}{z} y. \quad (2.78)$$

## 2.8 Определение массы обмоточного провода и сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии

### 2.8.1 Расчет массы обмоточного провода

Массу металла обмоточного провода, необходимого для изготовления обмотки, можно определить через плотность используемого материала и объем:

$$G = m \cdot \gamma \cdot \Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a' \cdot l_{\text{в}} \cdot W_{\text{ф}}, \quad (2.79)$$

где  $\gamma$  – плотность проводникового материала,  $\text{кг/м}^3$ , (для меди –  $8900 \text{ кг/м}^3$ , для алюминия –  $2700 \text{ кг/м}^3$ );

$\Pi_{\text{ГОСТ}}$  – сечение одной жилы обмоточного провода без изоляции,  $\text{м}^2$ ;

$\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'$  – полное сечение одного витка провода в секции,  $\text{м}^2$ ;

$l_{\text{в}} \cdot W_{\text{ф}}$  – длина провода обмотки одной фазы, м;

$m$  – число фаз обмотки, шт.

Массу обмотки провода с изоляцией и с учетом «срезок» (обрезки обмоточного провода, образующиеся при выполнении технологических процессов пайки и сварки), приблизительно можно рассчитать:

$$G' = 1,05 G, \text{ кг.} \quad (2.80)$$

### 2.8.2 Электрическое сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии

Электрическое сопротивление обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии необходимо определять для сравнения его с результатами измерений сопротивлений фазных обмоток отремонтированной машины при приемосдаточных и типовых испытаниях (см. ТКП 339-2011 (02230)). Сопоставление величин расчета и проведенных испытаний дает возможность выявления дефектов, допущенных при ремонте обмоток.

Электрическое сопротивление одной фазы обмотки постоянному току в холодном состоянии ( $R$ ) определяется из выражения, Ом:

$$R = \rho \frac{l_{\text{в}} \cdot W_{\text{ф}}}{\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'}, \quad (2.81)$$

где  $\rho$  – удельное сопротивление проводника. Для меди  $\rho = 0,0172 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ , для алюминия  $\rho = 0,0172 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$  при  $t = 20^\circ \text{C}$ .

## 2.9 Расчет номинальных данных

Номинальными данными называют оптимальные величины параметров, на которые рассчитана нормальная работа электрооборудования. Основные из них приводятся в паспорте (металлической пластине, прикрепленной к корпусу машины).

У асинхронного двигателя к таким расчетным номинальным данным относятся следующие величины:

$U_n$  – номинальное напряжение, В;

$I_n$  – номинальный ток, А;

$P_n$  – номинальная мощность, кВт;

$f_n$  – номинальная частота тока, Гц;

$n_n$  – номинальная частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности;

$\eta_n$  – номинальный коэффициент полезного действия (КПД);

$Y/\Delta$  – схема соединения обмотки.

Оптимальность этих показателей связана: с конструкцией электромашин; материалами, из которых она изготовлена; условиями ее работы и другими показателями.

Например, **номинальная частота тока**  $f_n$  в первую очередь связана с ЭДС одного витка (в соответствии с формулой (2.46)): чем больше  $f$ , тем выше  $E_{1в}$ , а следовательно, меньше  $W_\phi$  (2.47), то есть больше мощность электродвигателя при тех же размерах. Но вместе с увеличением  $f$  увеличиваются потери в листах электротехнической стали, а значит, нагрев машины. Вот почему номинальная частота  $f_n$  зависит от марки и толщины листов стали сердечника.

**Номинальная частота вращения ротора**  $n_n$  предопределена частотой вращения подвижных частей механизма электродвигателя, которые он приводит в действие.

**Номинальная схема соединения обмоток**  $Y/\Delta$  вытекает из требуемой величины напряжения, прилагаемой к фазной обмотке, а также условий пуска машины.

**Номинальный коэффициент мощности**  $\cos \varphi_n$  определяется рациональным соотношением между составляющими (активной  $P$  и реактивной  $Q$ ) полной мощности асинхронного двигателя  $S$ . Чем больше активная составляющая  $P$ , тем лучше, так как будут меньше потери в сети.

**Номинальный коэффициент полезного действия**  $\eta_n$  зависит от потерь в электрической машине (в основном в меди обмоток –  $P_{кз}$  и стали магнитопровода –  $P_{хх}$ ).

**Номинальное напряжение**  $U_n$  связано с электрической прочностью изоляции ( $E_{пр}$ ) машины. Причем, чем выше напряжение, тем больше должна быть прочность, а это связано с родом и толщиной используемых в изоляции составных диэлектриков, их  $E_{пр}$ .

**Номинальный ток**  $I_n$  устанавливается нагревом изоляции, в первую очередь за счет потерь в меди обмотки. Чем выше нагревостойкость изоляции и меньше потери, тем больше номинальный ток.

**Номинальная мощность**  $P_n$  является производной номинальных тока, напряжения, коэффициентов мощности и полезного действия, а значит, зависит от тех же показателей.

Из вышеприведенных величин  $U_n, f_n, n_n$ , схема соединения обмотки машины заданы заказчиком (см. начало расчета).

### 2.9.1 Номинальный ток

Номинальный ток двигателя можно определить как произведение плотности тока на активную площадь обмоточного провода, с учетом параллельных ветвей и сечений, А:

$$I_{нф} = j \cdot \Pi_{гост} \cdot a \cdot a', \quad (2.82)$$

где  $j$  – плотность тока, А/мм<sup>2</sup>;

$\Pi_{гост}$  – фактическое сечение провода без изоляции, мм<sup>2</sup>;

$a$  – число параллельных ветвей обмотки, шт.;

$a'$  – число параллельных сечений, шт.

Плотность тока, как и ток, в первую очередь, определяется допустимой температурой нагрева изоляции. Однако на скорость ее старения оказывают влияние также и многие другие факторы: способ пропитки обмоток, опыт работы обмотчика, охлаждение АД. Поэтому при выборе  $j$  (таблица 2.10), где они приводятся в зависимости от типа обмоток и мощности двигателей в довольно широких пределах, следует учитывать все параметры. Чтобы не допустить существенной ошибки в выборе плотности тока, найденная по формуле (2.81) величина фазного тока дополнительно проверяется по величине линейной нагрузки (таблица 2.10).

Линейная нагрузка двигателя представляет собой произведение тока и числа активных проводников во всех пазах электромашины, приходящихся на 1 м длины окружности внутренней расточки статора машины, А/м:

$$A = \frac{I_{\text{нф}} N_{\text{п}} z}{\pi D a}, \quad (2.83)$$

где  $N_{\text{п}}$  – число активных проводников в одном пазу, шт.;

$z$  – количество пазов магнитопровода статора, шт.;

$D$  – внутренний диаметр расточки статора, м.

Результат вычисления линейной нагрузки сравнивается с допустимыми значениями. Если будет иметь место расхождение, то необходимо соответствующим образом изменить плотность тока в обмотке. В идеале оптимальной будет наибольшая возможная плотность тока (при допустимой  $A_{\text{доп}}$ ), но вместе с тем следует учитывать сопутствующие факторы: состояние магнитопровода, пропитку обмотки и пр.

Таблица 2.10 – Нормированные плотности токов и линейных нагрузок асинхронных двигателей

Наименование		Мощность, кВт		
		до 1	1–10	10–100
Плотность тока в обмотке статора $j$ , А/мм <sup>2</sup>	Однослойная	5,5–6,5	4,5–5	3,5–3,8
	Двухслойная	6–8	5,5–6	4–4,5
Допустимая линейная нагрузка $A_{\text{доп}}$ , А/м·10 <sup>3</sup>	Однослойная	10,0–14,0	18,0–22,5	24,0–30,0
	Двухслойная	15,0–20,0	25,0–30,0	32,5–40,0

### 2.9.2 Номинальная мощность

Это та мощность, которую трехфазный асинхронный двигатель будет иметь на своем валу («снимается» с вала электродвигателя).

Для расчета номинальной мощности вначале определяется полная мощность трехфазного асинхронного двигателя, которую он забирает из сети, кВт · А:

$$S_{\text{дв}} = 3 \cdot I_{\text{нф}} \cdot U_{\text{нф}} \cdot 10^{-3}, \quad (2.84)$$

где  $I_{\text{нф}}$  – номинальный фазный ток, А;

$U_{\text{нф}}$  – номинальное фазное напряжение, В.

Полученная мощность  $S_{\text{дв}}$  в машине идет на создание вращающегося магнитного поля, на потери и выполнение полезной работы.

Как известно из курса электротехники, реактивная составляющая этой мощности  $Q$ , затрачиваемая на создание магнитного потока (величина практически постоянная для данного магнитопровода), возвращается обратно в сеть. Это учитывается углом  $\varphi$  между полной мощностью и ее активной составляющей. Следовательно (см. треугольник мощностей, рисунок 2.24), активная составляющая  $P_{\text{дв}}$  (присоединенная мощность), определяется из выражения

$$P_{\text{дв}} = 3 \cdot I_{\text{нф}} \cdot U_{\text{нф}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (2.85)$$

где  $\cos \varphi_{\text{н}}$  – номинальный коэффициент мощности.

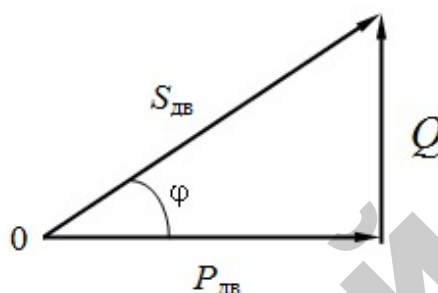


Рисунок 2.24 – Треугольник мощностей трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Ориентировочно расчетную номинальную мощность трехфазного асинхронного двигателя (мощность, идущая на выполнение полезной работы, мощность на валу) определяют по выражению:

$$P_{\text{н}} = 3 \cdot I_{\text{нф}} \cdot U_{\text{нф}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} \cdot \eta_{\text{н}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \quad (2.86)$$

где  $\eta_{\text{н}}$  – номинальный коэффициент полезного действия, который учитывает все активные потери в электрической машине.

Величины коэффициента мощности  $\cos \varphi$  и коэффициента полезного действия  $\eta$  предварительно можно принять по таблице 2.11.

Полученное значение мощности  $P_{\text{н}}$  (2.86) округляется до ближайшего стандартного  $P_{\text{н(ГОСТ)}}$ , и рассчитывается номинальный фазный ток\*:

$$I_{\text{нф(ГОСТ)}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{3U_{\text{нф}} \cdot \cos \varphi \cdot \eta}. \quad (2.87)$$

\*При расчете номинального тока  $I_{\text{нф(ГОСТ)}}$  значения коэффициента мощности  $\cos \varphi$  и коэффициента полезного действия  $\eta$  берут из каталожных данных при 100 %

нагрузке для данной модификации электродвигателя, аналогичному рассчитываемому по типу, мощности и синхронной частоте вращения магнитного поля статора.

Полученное значение номинального тока по ГОСТ необходимо проверить по допустимой линейной нагрузке:

$$A = \frac{I_{\text{нф(гост)}} \cdot N_{\text{п}} \cdot z}{\pi \cdot D \cdot a} \quad (2.88)$$

Если полученное значение линейной нагрузки не входит в допустимые пределы, то необходимо изменить выбранное по справочнику значение номинальной мощности и повторить проверку.

Таблица 2.11 – Средние значения  $\cos\varphi$  и  $\eta$  трехфазных асинхронных электродвигателей

Частота вращения $n$ , мин <sup>-1</sup>	Параметр	Мощность, кВт		
		до 1	1–10	10–100
3000	$\eta$	0,6–0,77	0,77–0,88	0,88–0,90
	$\cos\varphi$	0,7–0,87	0,87–0,90	0,90–0,92
1500	$\eta$	0,57–0,72	0,75–0,86	0,87–0,92
	$\cos\varphi$	0,65–0,74	0,81–0,86	0,87–0,91
1000	$\eta$	0,56–0,69	0,74–0,86	0,86–0,92
	$\cos\varphi$	0,62–0,72	0,74–0,82	0,86–0,89
750	$\eta$	0,56–0,68	0,70–0,85	0,86–0,92
	$\cos\varphi$	0,60–0,62	0,68–0,75	0,80–0,85

Примечание. Большие значения  $\cos\varphi$  и  $\eta$  берутся для больших мощностей АД.

Если полученное значение линейной нагрузки удовлетворяет допустимым пределам, то определяется фактическая плотность тока, А/мм<sup>2</sup>:

$$j_{\phi} = \frac{I_{\text{нф(гост)}}}{\Pi_{\text{гост}} \cdot a \cdot a'} \quad (2.89)$$

Примечание: в случае, когда магнитная система ремонтируемой машины не соответствует исходной номинальной частоте вращения  $n_{\text{н}}$ , на которую она была рассчитана, а следовательно, нарушена согласованность площадей  $Q_{\delta}$ ,  $Q_z$ ,  $Q_c$ , проверку линейной нагрузки после определения  $j$  проводить нерационально, можно ограничиться пределами допустимых плотностей тока (таблица 2.10).



## 2.10 Перерасчеты обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей на другие параметры

### 2.10.1 Перерасчет асинхронного электродвигателя на другое напряжение

Для определения параметров новой обмотки пользуются формулами ранее проведенных расчетов. Число витков в обмотке одной фазы машины (2.47) и (2.37):

$$W_{\phi} = \frac{0,97U_{\phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{об}} \quad \text{или} \quad W_{\phi} = \frac{0,97U_{\phi}}{E_{1в}}$$

Так как при изменении напряжения старого  $U_{\phi c}$  на новое  $U_{\phi н}$  магнитная система двигателя и частота тока для рассматриваемых обмоток не меняется, то ЭДС одного витка также величина постоянная ( $E_{1в} = 4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{об}$ ).

Следовательно, для старой обмотки:

$$W_{\phi c} = \frac{0,97U_{\phi c}}{E_{1в}}; \quad \Rightarrow \quad E_{1в} = \frac{0,97U_{\phi c}}{W_{\phi c}}. \quad (2.90)$$

Для новой обмотки:

$$W_{\phi н} = \frac{0,97U_{\phi н}}{E_{1в}}; \quad \Rightarrow \quad E_{1в} = \frac{0,97U_{\phi н}}{W_{\phi н}}. \quad (2.91)$$

При равенстве выражений (2.90) и (2.91)  $E_{1в}$  получаем, что число витков в обмотке одной фазы можно получить из уравнения:

$$W_{\phi н} = W_{\phi c} \cdot \frac{U_{\phi н}}{U_{\phi c}}. \quad (2.92)$$

Округляем до ближайшего целого и четного значения  $W_{\phi н}$  шт.

Изменение числа витков в фазе пропорционально меняет число активных проводников в одном пазу  $N_{пн}$ :

$$N_{пн} = N_{пс} \cdot \frac{U_{\phi н}}{U_{\phi c}}. \quad (2.93)$$

Для двухслойной обмотки округляем  $N_{пн}$  до целого четного числа.

Для однослойной обмотки округляем  $N_{\text{пн}}$  до целого числа.

Уточняем количество витков в фазе по формуле

$$W_{\phi}' = \frac{N_{\text{пн}} \cdot z}{2ma}.$$

Число витков в одной секции, шт.:

$$W_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N_{\text{пн}}}{2}.$$

Сделанные преобразования позволяют получить новое сечение  $\Pi_{\text{рн}}$  и диаметр провода с изоляцией новой обмотки  $d_{\text{н}}'$ :

$$\Pi_{\text{рн}} = \Pi_{\text{рс}} \frac{U_{\text{фс}}}{U_{\text{фн}}}, \quad (2.94)$$

$$d_{\text{н}}' = d_{\text{с}}' \cdot \sqrt{\frac{U_{\text{фс}}}{U_{\text{фн}}}}, \quad (2.95)$$

В таблицах справочников, приложениях (см. приложение 7, таблицы 14–15) принимаем новый стандартный обмоточный провод наружным диаметром с изоляцией  $d'_{\text{гост н}}$  мм и без изоляции  $d_{\text{гост н}}$  мм и сечением  $\Pi_{\text{гост н}}$  мм<sup>2</sup>.

Диаметр изолированного провода должен быть на 1,5–2 мм меньше ширины шлица паза ( $b_{\text{ш}}$ ):  $d_{\text{н}}' \leq b_{\text{ш}} - 1,5$ .

Если учесть, что количество полюсов при новой обмотке относительно старой, не изменится, все обмоточные данные ( $a, y, q, N$  и  $a'$ ) берутся по данным старой обмотки, а значит, и схема обмотки останется прежней. Также останутся прежними: размер витка  $l_{\text{в}}$ , масса обмоточного провода  $G'$ , номинальная мощность машины  $P_{\text{н}}$  (так как изменение номинального тока  $I_{\text{н}}$  пропорционально номинальному напряжению  $U_{\text{н}}$ ).

В этом случае целесообразно провести проверку только сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в холодном состоянии –  $R$ .

Сопротивление обмотки одной фазы в холодном состоянии определяется по формуле (2.80):

$$R = \rho \cdot \frac{l_{\text{в}} \cdot W_{\phi}}{\Pi_{\text{гост}} \cdot a \cdot a'}, \text{ Ом.}$$

### 2.10.2 Перерасчет асинхронного электродвигателя на другую частоту вращения

Как было отмечено в п. 2.5.1, при перерасчете на другую частоту вращения вначале следует уточнять допустимость такого перерасчета. Так как при изменении частоты после ремонта может иметь место «залипание» (когда ротор не проворачивается при включении машины в сеть), либо «застревание» (ротор вращается на значительно пониженных оборотах), а также может появиться «повышенный шум».

Причинами являются наличие высших гармонических составляющих в магнитном потоке электрической машины, а они связаны с нарушением соотношения между числами зубцов статора ( $Z_1$ ) и ротора ( $Z_2$ ) магнитопровода. Для предупреждения таких явлений, как «залипание», «застревание» и «повышенный шум», необходимо выполнить проверки по условиям (2.58), (2.59) и (2.60).

В случае если расчеты дали положительный результат, можно приступить к перерасчету обмотки путем преобразования уже известных выражений:

$$W_{\phi} = \frac{0,97U_{\phi}}{4,44 \cdot f \cdot \Phi \cdot K_{об}}$$

или

$$0,97 U_{\phi} = 4,44 \cdot \Phi \cdot f \cdot K_{об} \cdot W_{\phi},$$

но, так как  $\Phi = \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta}$ , а частота тока  $f = \frac{pn}{60}$ , то тогда:

$$0,97 \cdot U_{\phi c} = 4,44 \frac{P_c \cdot n_c}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta c} \cdot K_{об} \cdot W_{\phi c},$$

$$0,97 \cdot U_{\phi н} = 4,44 \frac{P_n \cdot n_n}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta н} \cdot K_{об} \cdot W_{\phi н}.$$

Если величины фазных напряжений равны ( $U_{\phi c} = U_{\phi н}$ ), то

$$4,44 \frac{P_c \cdot n_c}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta c} \cdot K_{об} \cdot W_{\phi c} = 4,44 \frac{P_n \cdot n_n}{60} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot B_{\delta} \cdot Q_{\delta н} \cdot K_{об} \cdot W_{\phi н}.$$

Сокращая в правой и левой части равенства одинаковые величины и учитывая, что произведения  $P_c \cdot Q_{\delta c}$  и  $P_n \cdot Q_{\delta n}$  равны (это площадь одной и той же расточки статора), получим:

$$n_c \cdot W_{\phi c} = n_n \cdot W_{\phi n}.$$

При перерасчете электродвигателя на меньшую частоту вращения  $n_n < n_c$  воспользуемся выражениями:

$$W_{\phi n} = W_{\phi c} \cdot \frac{n_c \cdot K_{\Pi}}{n_n}. \quad (2.96)$$

Тогда число витков в секции будет равно, шт.:

$$W_{\text{сек}_n} = W_{\text{сек}_c} \cdot \frac{n_c \cdot K_{\Pi}}{n_n}, \quad (2.97)$$

где  $K_{\Pi}$  – поправочный коэффициент перерасчета,  $K_{\Pi} = 0,65 - 0,85$ .

Изменение  $W_{\phi}$  и  $W_{\text{сек}}$ , а также числа активных проводников в пазу, приведет к изменению сечения обмоточного провода  $\Pi_p$  мощности двигателя машины  $P_n$ .

$$\Pi_{pn} = \Pi_c \cdot \frac{n_n}{n_c \cdot K_{\Pi}}, \quad P_n = P_c \cdot \frac{n_n}{n_c \cdot K_{\Pi}}. \quad (2.98)$$

Если частота вращения электродвигателя увеличивается  $n_n \geq n_c$ , то для перерасчета воспользуемся выражениями (2.99–2.101):

$$W_{\phi n} = W_{\phi c} \cdot \frac{n_c}{n_n \cdot K_{\Pi}}, \quad (2.99)$$

$$W_{\text{сек}_n} = W_{\text{сек}_c} \cdot \frac{n_c}{n_n \cdot K_{\Pi}}, \quad (2.100)$$

$$\Pi_{pn} = \Pi_c \cdot \frac{n_n \cdot K_{\Pi}}{n_c}, \quad P_n = P_c \cdot \frac{n_n \cdot K_{\Pi}}{n_c}. \quad (2.101)$$

Главное условие при перерасчете – сохранение допустимых величин магнитных нагрузок в магнитопроводе статора ( $B_\delta$ ,  $B_z$ ,  $B_c$ ) неизменными. Не должно меняться также и напряжение, приложенное к обмотке.

Чем больше разница между старой и новой частотой вращения, тем меньшим принимают значение поправочного коэффициента.

Введение поправочного коэффициента обусловлено тем, что при уменьшении числа полюсов (увеличении частоты вращения) и при сохранении индукции в воздушном зазоре возрастает индукция в спинке статора. В зубцовой зоне она остается неизменной. При увеличении числа полюсов (уменьшении частоты вращения) имеет место обратная зависимость.

Перерасчитываются и обмоточные данные, при этом шаг обмотки и число пазов на полюс и фазу можно находить по выражениям:

$$y'_H = y_c \cdot \frac{n_H}{n_c}. \quad (2.102)$$

$$q_H = q_c \cdot \frac{n_H}{n_c}. \quad (2.103)$$

Схема обмотки при переходе на другую частоту вращения поменяется, значит необходимо рассчитать все недостающие обмоточные данные.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сердешнов, А. П. Ремонт электрооборудования в 2 частях. Часть 1. Ремонт электрических машин : учебное пособие для студентов энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования / А. П. Сердешнов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2006. – 296 с.
2. Расчеты электрооборудования при ремонте : учебно-методическое пособие к практическим занятиям по курсу «Ремонт электрооборудования»/ БГАТУ, кафедра электроснабжения ; сост. : А. П. Сердешнов, О. Ю. Селицкая. – Минск : БГАТУ, 2007. – 125 с.
3. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию (5-е изд. испр.) / Серия «Справочники». – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 480 с.
4. Лихачев, В. Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей / В. Л. Лихачев. – М. : Солон-Р, 2004. – 240 с.
5. Кисаримов, Р. А. Ремонт электрооборудования. Справочник. В 3-х томах. Том 1 / Р. А. Кисаримов. – М. : ИП Радиософт, 2005. – 540 с.
6. Общие требования к организации проектирования и правила оформления дипломных и курсовых проектов (работ) : учебно-методическое пособие / В. В. Гурин, Е. С. Якубовская, И. П. Матвеевко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2014. – 144 с.
7. Быстрицкий, Г. Ф. Энергосиловое оборудование промышленных предприятий : учебное пособие / Г. Ф. Быстрицкий. – М. : АCADEMIA, 2003. – 304 с.
8. Правила эксплуатации электроустановок потребителей: обязательны для всех потребителей электроэнергии независимо от их ведомственной принадлежности и форм собственности. – 5-е изд., перераб. и доп. – М. : Энергосервис, 2000. – 287 с.

***Технические нормативные правовые акты***

9. ГОСТ 21.101–93 СПДС. Основные требования к рабочей документации : система проектной документации для строительства / МНТКС. – Взамен ГОСТ 21.10479, ГОСТ 21.105–79, ГОСТ 21.201–78, ГОСТ 21.202–78. – Минск, 1995. – 44 с.
10. ТПК 339–2011 (02230) «Электроустановки на напряжение до 750 кВ. Линии электропередачи воздушные и токопроводы, устройства распределительные и трансформаторные подстанции, установки электросиловые и аккумуляторные, электроустановки жилых и общественных зданий. Правила устройства и защитные меры электробезопасности. Учет электроэнергии. Нормы приемо-сдаточных испытаний». – Введ. 2011-12-01 ; введен впервые. – Минск : Минэнерго, 2011. – 594 с.

11. ТПК 181–2009 (02230) «Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей». – Введ. 2009-09-01 ; введен впервые с отменой Правил технической эксплуатации электрооборудования потребителей, утвержденных приказом Министерства энергетики СССР от 15 июня 1989 г. № 347. – Минск : Минэнерго, 2009. – 326 с.

Репозиторий БГАТУ

**ПРИЛОЖЕНИЯ**

Репозиторий БГАТУ



Пример выполнения титульного листа ПЗ курсовой работы

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

УЧРЕЖДЕНИЕ ОБРАЗОВАНИЯ  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Агроэнергетический факультет

Кафедра электроснабжения

Курсовая работа  
по дисциплине «Ремонт электрооборудования»

Вариант № \_\_\_\_\_

**Тема: «Расчет обмотки статора трехфазного асинхронного  
электродвигателя с короткозамкнутым ротором при ремонте»**

*Студент* \_\_\_\_\_ *курса* \_\_\_\_\_ *группы*  
\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
(личная подпись) (ФИО)

*Шифр зачетной книжки*  
\_\_\_\_\_

*Руководитель*  
\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_/\_\_\_\_\_  
(личная подпись) (ФИО)

Минск, 20 \_\_\_\_\_

### Пример выполнения листа задания на курсовую работу

Министерство сельского хозяйства и продовольствия  
Республики Беларусь

Учреждение образования  
Белорусский государственный аграрный технический университет

Агроэнергетический факультет  
Кафедра электроснабжения

«УТВЕРЖДАЮ»  
Зав. кафедрой  
электроснабжения

(подпись) (инициалы, фамилия)

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

### ЗАДАНИЕ на курсовую работу

Студенту \_\_\_\_\_

курс \_\_\_\_\_ группа \_\_\_\_\_

Вариант № \_\_\_\_\_

Тема курсовой работы:

#### «РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ РЕМОНТЕ»

Срок сдачи законченной работы \_\_\_\_\_

Исходные данные:

#### 1. Основной расчет\*

<i>Данные магнитопровода и его паза</i>												
Вариант	$D$ , мм	$D_a$ , мм	$l$ , мм	$z_1 / z_2$ , шт	$b$ , мм	$b'$ , мм	$b_{ш}$ , мм	$h$ , мм	$e$ , мм	$\sigma$ , мм	Род изоляции	
<i>Технические условия заказчика</i>												
$n$ , мин <sup>-1</sup>			$U_{\phi}$ , В			$f$ , Гц			Схема соединения обмоток			

#### 2. Задание на перерасчет

$n'$ , мин <sup>-1</sup>	$U'_{\phi}$ , В	Второй лист графической части (формат А4)	

**\*Примечание.** Размеры магнитопровода и его паза:

$D$  – внутренний диаметр сердечника статора, мм;  $D_a$  – внешний диаметр сердечника статора, мм;  $l$  – полная длина сердечника статора, мм;  $z_1/z_2$  – число зубцов статора/число зубцов ротора;  $b$  – больший размер ширины паза, мм;  $b'$  – меньший размер ширины паза, мм;  $b_{ш}$  – ширина шлица паза, мм;  $h$  – полная высота паза, мм;  $e$  – высота усика паза, мм;  $\sigma$  – толщина листов стали, мм.

**Содержание пояснительной записки:** 1. Обмер магнитопровода и обработка полученных данных. 2. Обоснование выбора типа статорной обмотки. 3. Расчет обмоточных данных. 4. Принцип построения схемы статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя. 5. Расчет параметров обмотки:  $W_{\phi}$ ,  $W_{сек}$ ,  $N_{п.}$ . 6. Выбор изоляции паза и лобовых частей обмотки. 7. Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода. Расчет размеров секций. 8. Определение массы обмоточного провода  $G$  (кг); сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии  $R$  (Ом). 9. Расчет номинальных данных. 10. Перерасчеты обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей на другие параметры. 11. Расчет обмоточных данных, для построения развернутой схемы статорной обмотки по заданию на перерасчет. 12. Заключение. 13. Литература.

**Перечень графического материала:** **ЛИСТ 1 (формат А1)** – чертеж развернутой схемы двухслойной петлевой статорной обмотки с укороченным шагом по заданию основного расчета на синхронную частоту вращения магнитного поля статора  $n$  (мин<sup>-1</sup>) с указанием основных обмоточных данных и векторной диаграммы токов для принятого момента времени  $t_1$ . **ЛИСТ 2 (формат А4)** – чертеж развернутой схемы статорной обмотки в соответствии с заданием на перерасчет на синхронную частоту вращения магнитного поля статора  $n'$  (мин<sup>-1</sup>) с указанием основных обмоточных данных и векторной диаграммы токов для принятого момента времени  $t_1$ .

**Руководитель курсовой работы:** \_\_\_\_\_

**Календарный график работы:** пункты 1–4 (25 %) \_\_\_\_\_; пункт 5 (20 %) \_\_\_\_\_; пункты 6–8 (20 %) \_\_\_\_\_; пункты 9–11 (20 %) \_\_\_\_\_; пункты 12–13 (15 %) \_\_\_\_\_.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Сердешнов, А. П. Ремонт электрооборудования в 2 частях. Часть 1. Ремонт электрических машин : учебное пособие для студентов энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования / А. П. Сердешнов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2006. – 296 с.
- Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию (5-е изд. испр.) / Серия «Справочники». – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 480 с., ил.
- Лихачев, В. Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей / В. Л. Лихачев. – М. : Солон-Р, 2004. – 240 с.

**Руководитель** \_\_\_\_\_

(подпись, дата)

(инициалы, фамилия, уч. степень, звание)

**Студент**

**принял задание к исполнению** \_\_\_\_\_

(подпись, дата)

(инициалы и фамилия студента)

## Ведомость комплекта проектной документации

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
	<u>Текстовые документы</u>		
	Расчетно-пояснительная записка	... с.	
	<u>Чертежи</u>		
03.053.XXX.XX ГЧ	1. Развернутая схема двухслойной петлевой статорной обмотки с укороченным шагом.	1	A1
03.053.XXX.XX ГЧ	2. Развернутая схема статорной обмотки (в соответствии с вариантом задания, на синхронную частоту вращения магнитного поля статора, соответствующую заданию на перерасчет $n'$ ).	1	A4
<b>03.053.XXX.XX-ПЗ</b>			
<i>Расчет обмотки статора трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при ремонте</i>			
<i>Изм</i>	<i>Кол.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>
<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		
<i>Разраб.</i>			
<i>Руковод.</i>			
<i>Консульт</i>			
<i>Н.контр.</i>			
<i>Зав. каф.</i>			
<i>Трехфазный АД с короткозамкнутым ротором</i>		<i>Стадия</i>	<i>Лист</i>
		<i>С</i>	<i>1</i>
<i>Ведомость комплекта проектной документации</i>		<i>БГАТУ АЭФ № зачетной книжки</i>	

## РЕФЕРАТ

Курсовая работа выполнена в объеме: расчетно-пояснительная записка на \_\_\_\_ страницах печатного текста, таблиц – \_\_\_\_, рисунков – \_\_\_\_, графическая часть на 2 листах, в том числе формата А1 – 1 лист, формата А4 – 1 лист.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором, обмоточные данные, переменный магнитный поток, вращающееся переменное магнитное поле, изоляционные материалы и обмоточные провода, номинальные данные.

В курсовой работе, в соответствии с заданием, определены площади магнитной системы, через которые проходит переменный магнитный поток, выполнены расчеты обмоточных данных, на которые выполнены развернутые схемы обмоток. Определены все основные параметры статорной обмотки, выбраны оптимальные магнитные нагрузки, установлены номинальные данные электродвигателя.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
1. Обмер магнитопровода и обработка полученных данных .....	4
2. Обоснование выбора статорной обмотки .....	5
3. Расчет обмоточных данных.....	6
4. Принцип построения схемы статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя .....	7
5. Расчет параметров обмотки $W_{\phi}$ , $N_{\text{п}}$ , $W_{\text{сек}}^{(2)}$ .....	8
6. Выбор изоляции паза и лобовых частей .....	20
7. Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода. Расчет размеров секций .....	24
8. Определение массы обмоточного провода и сопротивления обмотки постоянному току в практически холодном состоянии .....	27
9. Расчет номинальных данных.....	30
10. Перерасчеты обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей на другие параметры .....	33
11. Расчет обмоточных данных для построения развернутой схемы статорной обмотки по заданию на перерасчет .....	37
12. Заключение.....	39
13. Литература.....	40

					<i>03.53.XXX.XX-ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ докум.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>					<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>							
<i>Консульт.</i>					<i>БГАТУ, № зач. кн.</i>		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Зав. каф.</i>							

*Пояснительная  
записка*

## Оформление проектной документации

1. **Проектной документации** присваивают обозначение, состоящее из базового цифрового обозначения, и через дефис – буквенного обозначения (см. структуру обозначения).

**Структура базового обозначения при курсовом проектировании:**

$X_1X_2.X_3X_4.X_5X_6X_7.X_8X_9 - X_{10}X_{11}X_{12}$ ,

где  $X_1X_2$  – индекс работы: 03 – курсовая работа;

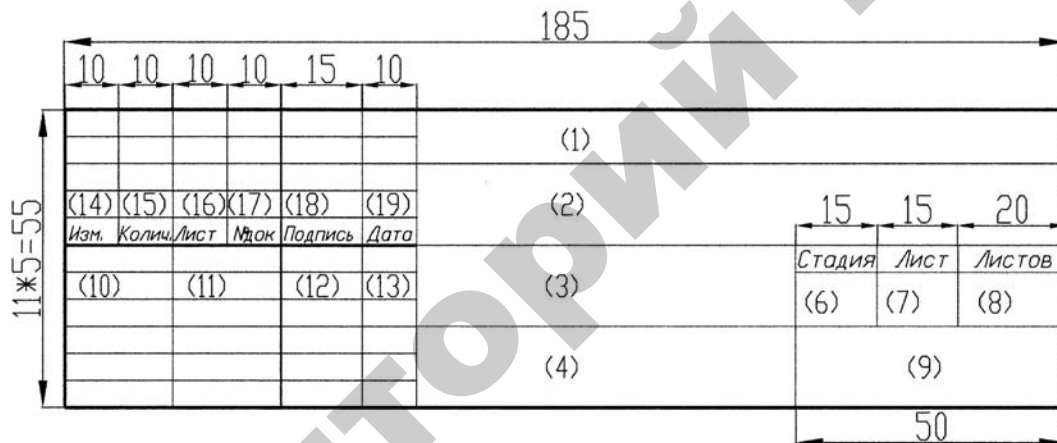
$X_3X_4$  – индекс кафедры;

$X_5X_6X_7$  – номер варианта по заданию;

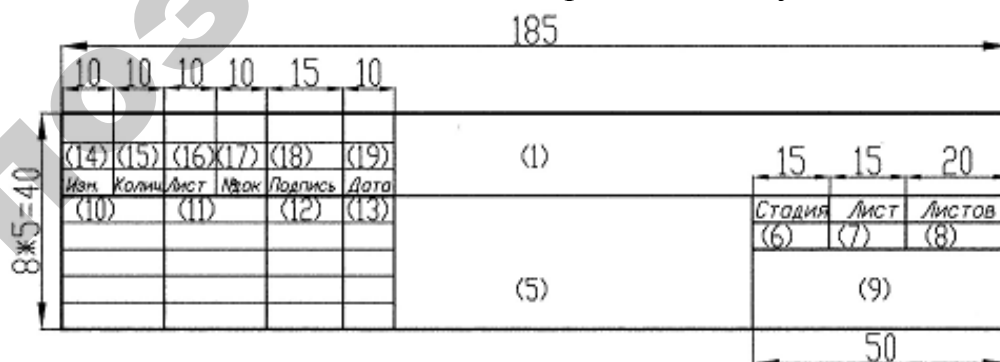
$X_8X_9$  – год разработки (две последние цифры года);

$X_{10}X_{11}X_{12}$  – для текстовых материалов – ПЗ, для графических материалов – марка разрабатываемого чертежа.

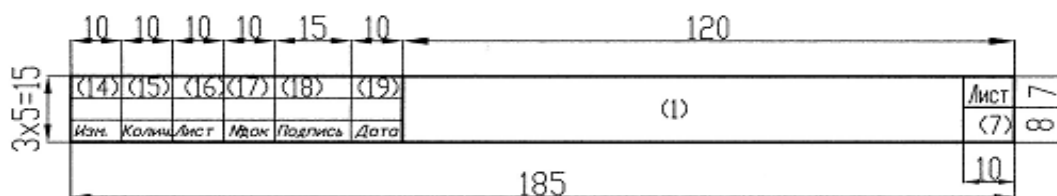
*Примечание.* Индекс кафедры электроснабжения – 53.



**Форма 1** основной надписи, которая применяется для листов графической части и листа ведомости комплекта проектной документации



**Форма 2** основной надписи, которая применяется для листа ПЗ, с которой начинается изложение текстовой части записки (обычно лист «Содержание»)



**Форма 3** основной надписи, которая применяется для последующих листов ПЗ

В графах основной надписи (номера граф показаны в скобках) указывают:

а) в графе 1 – обозначение проектной документации – маркировка документа:

– базовое обозначение (см. выше);

– добавляемая через дефис марка разрабатываемого чертежа – ЭМ;

б) в графе 2 – тему курсовой работы;

в) в графе 3 – разрабатываемый объект;

г) в графе 4 – наименование изображения или материала, помещенного на данном листе, т. е. название чертежа, листа;

д) в графе 5 – наименование документа аналогично графе 4 (обычно – «Пояснительная записка»);

е) в графе 6 – условное обозначение стадии проектирования: «С» (строительный проект);

ж) в графе 7 – порядковый номер листа. На документе, состоящем из одного листа, графу не заполняют;

з) в графе 8 – общее число листов документа;

и) в графе 9 на первой строке записывают наименование организации, разработавшей документ (БГАТУ), на второй строке – шифр зачетки студента;

к) в графе 10 – характер работы: «разработал» (студент); в следующей строке – «руководитель», далее – «консультант», «нормоконтролер», «зав. кафедрой»;

л) в графе 11 – фамилии студента, руководителя, консультанта(-ов), нормоконтролера, зав. кафедрой в соответствующих строках;

м) в графе 12 – подписи;

н) в графе 13 – даты.

Графы 14–19 в курсовых работах не заполняются.



## Данные по электроизоляционным материалам

Таблица 1 – Стеклоткань электроизоляционная

Марка	Толщина, мм	Область применения
ЛСМ-105/120	0,15; 0,17; 0,2; 0,24	Для работы на воздухе при нормальных климатических условиях
ЛСММ-105/120	0,17; 0,2; 0,24	Для работы в горячем трансформаторном масле с температурой до 105 °С
ЛСЭ-105/120	0,12; 0,15; 0,17; 0,2; 0,24	Для работы на воздухе при повышенной влажности (относительная влажность 95 % при $t = 20$ °С

Таблица 2 – Технические данные листового асбеста

Толщина, мм	Средняя плотность, кг/м <sup>3</sup>	Размеры листов, мм
2; 2,5; 3; 3,5; 4; 5; 6; 8; 10	1000–1300	900×900; 900×1000; 1000×1000

Таблица 3 – Картон электроизоляционный

Марка	Толщина, мм	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Электротехническая прочность при 50 Гц, МВ/м
ЭВ	0,1–3	950–1150	8–12
ЭВС	0,2–0,4	1250	10–12
ЭВП	0,1–0,2	1250	9–12
ЭВТ	0,1–0,5	1150	9–13

Таблица 4 – Лента из поливинилового пластика

Марка	Ширина, мм	Толщина, мм
	10	0,65
	13	0,55
	15	0,65; 1,5
ЛВ-40, ЛВ-50, ЛВ-40Т	18	0,55
	20	0,55; 0,9; 1,5
	40	0,55; 0,9; 1,35
	50	0,9
	105	1,5

Таблица 5 – Ленты хлопчатобумажные

Наименование	Ширина	Толщина, мм
Киперная	10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50	0,45
Тафтяная	10, 12, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 50	0,25
Миткалевая	12, 16, 20, 25, 30, 35	0,22
Батистовая	10, 12, 16, 20	0,12; 0,16; 0,18

Таблица 6 – Ленты электроизоляционные из стеклянных нитей

Марка	Толщина, мм	Интервал ширины, мм	Разрывная нагрузка по основе, Н	Линейная плотность, г/100 м
ЛЭС	0,08	10–40	235–785	95–385
ЛЭС	0,10	10–50	294–1128	106–565
ЛЭСБ	0,10	15–40	491–981	180–460
ЛЭС	0,15	10–50	392–1373	165–810
ЛЭСБ	0,15	15–40	598–1275	255–660
ЛЭС	0,20	10–50	491–2060	230–1090
ЛЭСБ	0,20	15–50	883–2256	330–1050
ЛЭСБ	0,25	15–40	981–2208	410–1020

**Примечание.** Ленты вырабатываются полотняным переплетением на челночных (ЛЭС) и бесчелночных (ЛЭСБ) станках. Ширина лент 10, 15, 20, 25, 30, 35, 40, 45, 50 мм.

Таблица 7 – Шнур-чулок стеклянный

Марка шнур-чулка	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Масса 100 м, г	Разрывная нагрузка по основе, не менее, Н
АСЭЧ (б) – 1,0	1,0	0,30–0,35	115	18
АСЭЧ (б) – 1,0	1,0	0,30–0,35	105	14
АСЭЧ (б) – 2,0	2,0	0,30–0,35	18	28
АСЭЧ (б) – 2,0 (промытый)	2,0	0,30–0,35	162	16
АСЭЧ (б) – 3,5	3,5	0,30–0,35	310	55
АСЭЧ (б) – 5,0	5,0	0,30–0,35	310	60
АСЭЧ (б) – 6,0	6,0	0,35–0,40	450	80
АСЭЧ (б) – 8,0	8,0	0,35–0,40	448	85

Таблица 8 – Электроизоляционные трубки

Марка	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Характеристика трубки
ТЛВ	0,5; 0,75; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,4; 4,0; 4,5;	0,5–0,9	Хлопчатобумажные (линоксидовые), лакированные светлым масляным лаком, Нагревостойкость 105 °С
ТЛМ	5–10		
ТПЛ	0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 8,0; 9,0; 10,0	0,4–0,8	Из лавсанового шелка, пропитанные полиэфирным лаком. Маслостойкие. Нагревостойкость 105 °С
ТЭЛ	0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5–10	0,4; 0,5	То же, но с нагревостойкостью 130 °С

## Окончание таблицы 8

Марка	Внутренний диаметр, мм	Толщина стенки, мм	Характеристика трубки
ТЭЛ	0,5; 0,75; 1,0; 1,5; 2,0; 2,5; 3,0; 3,5; 4,0; 4,5; 5–10	0,4; 0,5	То же, но с нагревостойкостью 130 °С
ТЭС	1,5; 1,7; 2,0; 2,5; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0	0,4; 0,5	Из стеклянных нитей, пропитанных эпоксидно-полиэфирным лаком. Нагревостойкость 130 °С
ТКС	1,5; 1,7; 2,0; 2,5; 3,5; 4,0; 4,5; 5,0; 6,0	0,4; 0,5	Из стеклянных нитей, пропитанных кремнийорганическим лаком. Нагревостойкость 180 °С
ТКСП	1–8	0,65–0,9	Трубки из стеклянных нитей, с нанесенным на их поверхность слоем кремнийорганической резины. Нагревостойкость 180 °С
ТРФ	1,2; 1,7; 2,2; 2,8; 3,8; 4,3; 4,8; 5,3; 6,4; 7,4; 8,4; 10,0	0,6–0,9	Трубки из фторорганической резины. Нагревостойкость 180 °С
ТКР	1,0; 1,5; 2,5; 3,0; 3,5; 4,5; 5,0; 8,0; 10,0; 12,0; 14,0; 16,0	0,9–2,5	Трубки из кремнийорганической резины. Нагревостойкость 180 °С
Трубки Ф4Д и Ф4ДМ	0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 1,0–10	0,2–1,5	Трубки из фторопласта Ф4Д и Ф4ДМ. Нагревостойкость 180 °С

**Примечание.** Пробивное напряжение трубок после 24 ч пребывания во влажной атмосфере не менее 2 кВ. Минимальная длина трубки 1 м.

Таблица 9 – Синтетические пленки

Наименование и марка пленки	Толщина, мкм	Эл. прочность кВ/мм $E_{пр}$	Нагревостойкость, °С	Внешний вид
1	2	3	4	5
Триацетатцеллюлозная	25, 40, 70	80–135	120	Непластифицированная голубого цвета; слабопластифицированная бесцветная
Полиэтилентерефталатная (лавсановая) (ПЭТФ)	8, 10, 12, 15, 25, 35, 40, 50, 70, 100, 125, 190, 250	70–180	155	Глянцевая без складок, поверхностных загрязнений и заусенцев

## Окончание таблицы 9

1	2	3	4	5
Полиамидная (ПМ)	30, 40, 50, 60, 100, 130	50–150	220	От темно-желтого до светло-коричневого цвета
Фторопластовая Ф 4ЭО (электроизоляционная ориентированная)	10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100	Не менее 120	260	Белого цвета, полупрозрачная или матовая без складок, трещин и отверстий
Фторопластовая Ф-4ЭН (электроизоляционная неориентированная)	20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90, 100, 130, 140, 150	Не менее 45	260	

Таблица 10 – Композиционные материалы на основе синтетических пленок

Наименование и марка пленки	Толщина $\delta$ , мм	$E_{пр}$ , кВ/мм	Нагревостойкость, °С
Пленкосинтокартон ПСК–ЛП	0,25–0,52	40	130
Пленкосинтокартон ПСК–Ф	0,22–0,46	40	155
Пленкослюдопласт ГИП–ЛСП–ПЛ	0,35; 0,40; 0,45	25–30	155
Пленкосбестокартон	0,3; 0,35	25–35	130
Изофлекс	0,13; 0,15; 0,17; 0,20; 0,25; 0,30; 0,40; 0,45; 0,50	25–100*	130
Изофлекс-3, -3Н	0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40	40	180
Имидофлекс	0,10; 0,13; 0,15; 0,17; 0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50	20–100*	180
Имидофлекс-5	0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 0,45; 0,50	20–50*	180

\*Большие значения берутся для материала меньшей толщины

Таблица 11 – Электроизоляционные бумаги и картоны

Материал	Марка	$\delta$ , мкм	$E_{пр}$ , кВ/мм	Общая характеристика
Бумага кабельная	К-120	120	10,0–12,0	Применяется в изоляции маломощных электрических машин

## Окончание таблицы 11

Материал	Марка	$\delta$ , мкм	$E_{пр}$ , кВ/мм	Общая характеристика
Картон электро- изоляционный для работы в воздушной среде	ЭВС	0,20; 0,25; 0,30; 0,35; 0,40; 12,0	12,0	Применяется в изоля- ции эл. машин средней и большой мощностей. Марки ЭВП и ЭВТ – только в рулонах
	ЭВП	0,10; 0,15; 0,20; 0,25; 0,30	12,0	
	ЭВТ	Тоже; 0,4; 0,5	12,0	

Таблица 12 – Электроизоляционные лакоткани

Марка лакоткани	Основа лакоткани	Пропиточный состав (лак)	Номинальная толщина $\delta$ , мм	Пробивное напряжение $U_{пр}$ , кВ	Нагревостойкость, °С
ЛХМ-105	Хлопчато- бумажная	Масляный	0,15; 0,17; 0,24; 0,30	4,0–9,5	до 105
ЛШМ- 105	Шелковая	Масляный	0,08; 0,10; 0,12; 0,15	1,0–8,5	до 105
ЛКМ-105	Капроно- вый шелк	Масляный	0,10; 0,12; 0,15	3,6–7,8	до 105
ЛСМ- 105/120	Стекло- вая	Масляный	0,15; 0,17; 0,20; 0,24	3,2–8,0	до 120
ЛСБ- 120/130	Стекло- вая	Битум- масляно- алкидный	0,12; 0,15; 0,17; 0,20; 0,24	2,6–10	до 130
ЛСМ- 155/180	Стекло- вая	Кремний органический	0,06; 0,08; 0,10	1,2–9,0	до 180

Таблица 13 – Характеристики обмоточных проводов

Марка	Характеристика изоляции	Класс нагревостойкости	Диаметр, мм
ПЭЛ	Лак на масляной основе	A	0,02–2,50
ПЭВ – 1	Уменьшенная толщина, лак на поли- винилацеталеновой основе	A	0,02–2,50
ПЭВ – 1	Номинальная толщина, лак на поли- винилацеталеновой основе	A	0,05–2,50
ПЭМ – 1	Лак ВЛ – 941	A	0,05–2,50
ПЭМ – 2	Повышенная толщина, лак ВЛ – 941	A	0,05–2,50
ПЭТВ – 2	Эмаль на основе полиэфирных лаков	B	0,06–2,50

## Окончание таблицы 13

Марка	Характеристика изоляции	Класс нагревостойкости	Диаметр, мм
ПЭТ – 155	Теплостойкий лак на полиэфиримидной основе	<i>F</i>	0,06–2,50
ПЭШО	Лак и один слой шелковых нитей	<i>A</i>	0,05–1,56
ПЭЛО	Лак и один слой полиэфирных нитей	<i>A</i>	0,20–1,32
ПЭБО	Лак и один слой х/б пряжи	<i>A</i>	0,38–2,12
ПБД	Два слоя нитей из х/б пряжи	<i>A</i>	0,355–5,30
ПСД	Стеклянные нити, наложенные двумя слоями с подклейкой и пропиткой нагревостойкими лаками	<i>F</i>	0,74–5,20
ПСД – Л	То же, но с поверхностным лаковым слоем	<i>F</i>	1,00–5,20
ПСД – Т	То же, но с уменьшенной толщиной	<i>F</i>	0,315–2,12
ПСДТ – Л	То же, но с поверхностным лаковым слоем	<i>F</i>	0,315–2,12
ПСДК	Стеклянные нити наложенные двумя слоями с подклейкой и пропиткой кремнийорганическим лаком	<i>H</i>	0,74–5,20
ПСДК – Л	То же, но с поверхностным лаковым слоем	<i>H</i>	1,00–5,20
ПСДКТ	То же, но с уменьшенной толщиной	<i>H</i>	0,315–2,12
ПСДКТ – Л	Бесщелочное стекловолокно, наложенное двумя слоями с подклейкой и пропиткой терморезистивным лаком	<i>H</i>	0,315–2,12

Таблица 14 – Диаметр круглых медных проводов с эмалевой изоляцией

Обозначения:  $d'_{\text{ГОСТ}}$  – диаметр проволоки без изоляции, мм; $d_{\text{ГОСТ}}$  – наружный диаметр провода с изоляцией, мм.

$d'_{\text{ГОСТ}}$	$d_{\text{ГОСТ}}$ – для марок				
	ПЭВ – 2	ПЭМ – 2	ПЭТ – 155	ПЭТВ – 2	ПЭТВМ
<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>	<i>4</i>	<i>5</i>	<i>6</i>
0,050	0,080	0,080	–	–	–
0,060	0,090	0,090*	0,090	0,084	–
0,063	0,090	0,093	0,090	0,084	–
0,070	–	0,100*	–	–	–

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5	6
0,071	0,100	0,101	0,100	0,094	–
0,080	0,110	0,110	0,110	0,104	–
0,090	0,120	0,120	0,120	0,116	–
0,100	0,130	0,130	0,130	0,128	–
0,110	–	0,140*	0,140	–	–
0,112	0,140	0,142	–	0,140	–
0,120	0,150	0,150*	0,150	0,150	–
0,125	0,155	0,155	0,155	0,154	–
0,130	0,160	0,160*	0,160	0,160	–
0,140	0,170	0,170	0,170	0,170	–
0,150	0,190	0,190*	0,190	0,190	–
0,160	0,200	0,200	0,200	0,198	–
0,170	0,210	0,210	0,210	0,210	–
0,180	0,220	0,220	0,220	0,220	–
0,190	0,230	0,230*	0,230	0,230	–
0,200	0,240	0,240	0,240	0,240	–
0,210	0,250	0,260*	0,260	0,250	–
0,224	0,270	0,264	0,270	0,264	–
0,230	–	0,280*	–	–	–
0,236	0,285	–	0,285	0,286	–
0,250	0,300	0,300	0,300	0,300	0,310
0,265	0,315	–	0,315	0,314	0,325
0,270	–	0,320*	–	–	–
0,280	0,330	0,330	0,330	0,330	0,340
0,290	–	0,340*	–	–	–
0,300	0,350	–	0,350	0,350	0,360
0,310	–	0,360*	–	–	–
0,315	0,365	0,365	0,365	0,364	0,375
0,330	–	0,380*	–	–	–
0,335	0,385	–	0,385	0,384	0,395

Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5	6
0,350	—	0,410*	—	—	—
0,355	0,415	0,415	0,405	0,414	0,425
0,380	0,440	0,440*	0,440	0,440	0,450
0,400	0,460	0,460	0,460	0,460	0,470
0,410	—	0,470*	—	—	—
0,425	0,485	—	0,490	0,484	0,495
0,440	—	0,500*	—	—	—
0,450	0,510	0,510	0,520	0,510	0,520
0,470	—	0,530*	—	—	—
0,475	0,545	—	0,545	0,534	0,545
0,490	—	0,550*	—	—	—
0,500	0,570	0,570	0,570	0,560	0,580
0,510	—	0,580*	—	—	—
0,530	0,600	0,600*	0,600	0,600	0,610
0,550	—	0,620*	—	—	—
0,560	0,630	0,630	0,630	0,630	0,640
0,570	—	0,640*	—	—	—
0,590	—	0,660*	—	—	—
0,600	0,670	—	0,670	0,670	0,680
0,620	—	0,690*	—	—	—
0,630	0,700	0,700	0,710	0,700	0,720
0,640	—	0,720*	—	—	—
0,670	0,750	0,750*	0,750	0,750	0,760
0,690	0,770*	0,770*	0,770	0,770*	0,780*
0,710	0,790	0,790	0,790*	0,790	0,800
0,720	—	0,800*	—	—	—
0,740	—	0,830*	—	—	—
0,750	0,840	0,840	0,830	0,830	0,840
0,770	0,860*	0,860*	0,850*	0,850*	0,860*
0,800	0,890	0,890	0,890	0,880	0,890
0,830	0,920*	0,920*	0,920*	0,910*	0,920*
0,850	0,940	0,940	0,940	0,930	0,940
0,860	—	0,950*	—	—	—



Продолжение таблицы 14

1	2	3	4	5	6
0,900	0,990	0,990	0,990	0,990	0,990
0,930	1,020	1,020*	1,020*	1,020*	1,020*
0,950	1,040*	1,040*	1,040	–	1,040
0,960	–	1,050*	–	1,040	–
1,000	1,100	1,110	1,090	1,090	1,110
1,040	–	1,150*	–	–	–
1,060	1,160	1,170	1,160	1,150	1,170
1,080	1,180*	1,190*	1,180*	1,170*	1,190*
1,120	1,220	1,230	1,220	1,210	1,230
1,160	–	1,270*	–	–	–
1,180	1,280	1,290	1,280	1,270	1,290
1,200	–	1,310*	–	–	–
1,25	1,35	1,36	1,35	1,35	1,36
1,30	–	1,41*	–	–	–
1,32	1,42	1,43	1,42	1,42	1,43
1,35	–	1,46	–	–	–
1,40	1,51	1,51	1,51	1,50	–
1,45	1,56*	1,56*	1,56*	1,55*	–
1,50	1,61	1,61	1,61	1,60	–
1,56	1,67*	1,67*	1,67*	1,67*	–
1,60	1,71	1,71	1,71	1,71	–
1,62	–	1,73*	–	–	–
1,68	–	1,79*	–	–	–
1,70	1,81	1,81	1,81	1,81	–
1,74	–	1,85*	–	–	–
1,80	1,92	1,92	1,92	1,91	–
1,81	–	1,93*	–	–	–
1,88	–	2,00*	–	–	–
1,90	2,02	2,02	2,02	2,01	–
1,95	–	2,07*	–	–	–
2,00	2,12	2,12	2,12	2,12	–
2,02	–	2,14*	–	–	–
2,10	–	2,23*	–	–	–

## Окончание таблицы 14

1	2	3	4	5	6
2,12	2,24	2,25	2,24	2,24	—
2,24	2,37	2,37	2,37	2,36	—
2,26	—	2,39*	—	—	—
2,36	2,49	2,49	2,49	2,48	—
2,44	2,57*	2,57*	2,57*	2,56*	—
2,50	2,63	2,63	2,63	2,63	—

\* В новых изделиях применять запрещается

## Таблица 15 – Диаметр проводов со стекловолоконистой изоляцией

Обозначения:  $d'_{\text{ГОСТ}}$  – диаметр проволоки без изоляции, мм;

$d_{\text{ГОСТ}}$  – наружный диаметр провода с изоляцией, мм.

$d'_{\text{ГОСТ}}$	$d_{\text{ГОСТ}}$ – для марок					
	ПСД, ПСДК	ПСДТ	ПСДКТ	ПСД – Л, ПСДК – Л	ПСДТ – Л	ПСДКТ – Л
1	2	3	4	5	6	7
0,315	—	0,500	0,460	—	0,480	0,480
0,335	—	0,520	0,480	—	0,500	0,500
0,355	—	0,540	0,500	—	0,520	0,520
0,380	—	0,570	0,530	—	0,550	0,550
0,400	—	0,590	0,550	—	0,570	0,570
0,425	—	0,620	0,580	—	0,600	0,600
0,450	—	0,640	0,600	—	0,620	0,620
0,475	—	0,670	0,620	—	0,650	0,650
0,500	0,740*	0,690	0,650	—	0,670	0,670
0,530	—	0,730	0,700	—	0,700	0,700
0,560	0,820*	0,760	0,730	—	0,730	0,730
0,600	—	0,800	0,770	—	0,770	0,770
0,630	0,890*	0,830	0,800	—	0,800	0,800
0,670	—	0,870	0,840	—	0,840	0,840
0,690*	—	0,890	0,860	—	0,860	0,860
0,710	0,980*	0,930	0,890	—	0,890	0,890

Окончание таблицы 15

1	2	3	4	5	6	7
0,750	1,020*	0,970	0,930	–	0,930	0,930
0,770*	–	0,990	0,950	–	0,950	0,950
0,800	1,070*	1,020	0,980	–	0,980	0,980
0,830*	–	1,050	1,010	–	0,980	0,980
0,850	1,120*	1,070	1,030	–	1,030	1,030
0,900	1,170*	1,120	1,080	–	1,080	1,080
0,930*	–	1,150	1,110	–	1,110	1,110
0,950	1,220*	1,170	1,130	–	1,130	1,130
1,000	1,290	1,230	1,200	1,290	1,220	1,220
1,060	1,359	1,230	1,260	1,350	1,280	1,280
1,080*	1,370	1,310	1,280	1,370	1,300	1,300
1,120	1,410	1,350	1,320	1,410	1,340	1,340
1,180	1,470	1,410	1,380	1,470	1,400	1,400
1,250	1,540	1,480	1,450	1,540	1,470	1,470
1,320	1,610	1,550	1,520	1,610	1,540	1,540
1,400	1,690	1,630	1,600	1,690	1,620	1,620
1,450*	1,740	1,680	1,650	1,740	1,670	1,670
1,500	1,790	1,730	1,700	1,790	1,720	1,720
1,560*	1,850	1,790	1,760	1,850	1,780	1,780
1,600	1,890	1,850	1,840	1,890	1,850	1,850
1,700	1,990	1,950	1,940	1,990	1,950	1,920
1,800	2,090	2,050	2,040	2,090	2,050	2,020
1,900	2,190	2,150	2,140	2,190	2,150	2,120
2,000	2,290	2,250	2,240	2,290	2,250	2,220
2,120	2,410	2,370	2,360	2,410	2,370	2,340

\* В новых изделиях применять запрещается

Таблица 16 – Технические данные двигателей серии АИ

Тип двигателя	$P_n$ , кВт	$\eta_n$ , %	$\cos\varphi_n$	$S_n$ , %	$\frac{M_p}{M_n}$	$\frac{M_{max}}{M_n}$	$\frac{M_{min}}{M_n}$	$\frac{I_p}{I_n}$	Момент инерции кг·м <sup>2</sup>	Масса, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
<b>Синхронная частота вращения 3000 мин<sup>-1</sup></b>										
АИР50А2	0,09	60	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	0,000025	2,5
АИР50В2	0,12	63	0,75	11,5	2,2	2,2	1,8	4,5	0,000028	2,8
АИР56А2	0,18	68	0,78	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00042	3,4
АИР56В2	0,25	69	0,79	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00047	3,9
АИР63А2	0,37	72	0,86	9	2,2	2,2	1,8	5	0,00076	4,7
АИР63В2	0,55	75	0,85	9	2,2	2,2	1,8	5	0,0009	5,45
АИР71А2	0,75	78,5	0,83	6	2,1	2,2	1,6	6	0,00097	6,5
АИР71В2	1,1	79	0,83	6,5	2,1	2,2	1,6	6	0,0011	8,8
АИР80А2	1,5	81	0,85	5	2,1	2,2	1,6	7	0,0018	9,8
АИР80В2	2,2	83	0,87	5	2	2,2	1,6	7	0,0021	13,2
АИР90L2	3	84,5	0,88	5	2	2,2	1,6	7	0,0035	16,7
АИР100S2	4	87	0,88	5	2	2,2	1,6	7,5	0,0059	21,6
АИР100L2	5,5	88	0,89	5	2	2,2	1,6	7,5	0,0075	27,4
АИР112M2	7,5	87,5	0,88	3,5	2	2,2	1,6	7,5	0,01	41
АИР132M2	11	88	0,9	3	1,6	2,2	1,2	7,5	0,023	64
АИР160S2	15	90	0,89	3	1,8	2,7	1,7	7	0,039	100
АИР160M2	18,5	90,5	0,9	3	2	2,7	1,8	7	0,043	110
АНР180S2	22	90,5	0,89	2,7	2	2,7	1,9	7	0,057	160
АИР180M2	30	91,5	0,9	2,5	2,2	3	1,9	7,5	0,07	180
АИР200M2	37	91,5	0,87	2	1,6	2,8	1,5	7	0,13	220
АИР200S2	45	92	0,88	2	1,8	2,8	1,5	7,5	0,14	240
АИР225M2	55	92,5	0,91	2	1,8	2,6	1,5	7,5	0,22	320
АИР250S2	75	93	0,9	2	1,8	3	1,6	7,5	0,41	425
АИР250M2	90	93	0,92	2	1,8	3	1,6	7,5	0,46	455
<b>Синхронная частота вращения 1500 мин<sup>-1</sup></b>										
АИР50А4	0,06	53	0,63	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000029	2,6
АИР50В4	0,09	57	0,65	11	2,3	2,2	1,8	4,5	0,000033	2,9
АИР56А4	0,12	63	0,66	10	2,3	2,2	1,8	5	0,00070	3,35
АИР56В4	0,18	64	0,68	10	2,3	2,2	1,8	5	0,00079	3,9
АИР63А4	0,25	68	0,67	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0012	4,7
АИР63В4	0,37	68	0,7	12	2,3	2,2	1,8	5	0,0014	5,6
АИР71А4	0,55	70,5	0,7	9,5	2,3	2,2	1,8	5	0,0013	7,8

Продолжение таблицы 16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АИР71В4	0,75	73	0,76	10	2,2	2,2	1,6	5	0,0014	8,8
АИР80А4	1,1	75	0,81	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0032	9,9
АИР80В4	1,5	78	0,83	7	2,2	2,2	1,6	5,5	0,0033	12,1
АИР90L4	2,2	81	0,83	7	2,1	2,2	1,6	6,5	0,0056	17
АИР100S4	3	82	0,83	6	2	2,2	1,6	7	0,0087	21,6
АНР100L4	4	85	0,84	6	2	2,2	1,6	7	0,011	27,3
АИР112М4	5,5	85,5	0,86	4,5	2	2,5	1,6	7	0,017	41
АИР132S4	7,5	87,5	0,86	4,0	2	2,5	1,6	7,5	0,028	58
АИР132М4	11	87,5	0,87	3,5	2	2,7	1,6	7,5	0,04	70
АМР160S4	15	90	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	0,078	100
АИР160М4	18,5	90,5	0,89	3	1,9	2,9	1,8	7	0,1	110
АНР180S4	22	90,5	0,87	2,5	1,7	2,4	1,5	7	0,15	170
АИР180М4	30	92	0,87	2	1,7	2,7	1,5	7	0,19	190
АИР200М4	37	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	0,28	245
АИР200S4	45	92,5	0,89	2	1,7	2,7	1,6	7,5	0,34	270
АИР225М4	55	93	0,89	2	1,7	2,6	1,6	7	0,51	335
АИР250S4	75	94	0,88	1,5	1,7	2,5	1,4	7,5	0,89	450
АИР250М4	90	94	0,89	1,5	1,5	2,5	1,3	7,5	1,1	480
АИР280S4	110	93,5	0,91	2,2	1,6	2,2	1	6,5	2,3	594
АИР280М4	132	94	0,93	2,2	1,6	2,2	1	6,5	2,5	752
АИР315S4	160	93,5	0,91	2	1,4	2	1	5,5	3,1	896
АИР315М4	200	94	0,92	2	1,4	2	0,9	5,5	3,6	1000
АМР355S4	250	94,5	0,92	2	1,4	2	0,9	7	6	1275
АИР355М4	315	94,5	0,92	2	1,4	2	0,9	7	7	1480
<b>Синхронная частота вращения 1000 мин<sup>-1</sup></b>										
АИР63А6	0,19	56	0,62	14	2	2,2	1,6	4	0,0018	4,65
АИР63В6	0,25	59	0,62	14	2	2,2	1,6	4	0,0022	5,6
АИР71А6	0,37	65	0,65	8,5	2	2,2	1,6	4,5	0,0017	7,8
АИР80В6	1,1	74	0,74	8	2	2,2	1,6	4,5	0,0046	13,4
АИР90L6	1,5	76	0,72	7,5	2	2,2	1,6	6	0,0073	16,9
АИР100L6	2,2	81	0,74	5,5	2	2,2	1,6	6	0,013	22,8
АИР112МА6	3	81	0,76	5	2	2,2	1,6	6	0,017	35
АИР112МВ6	4	82	0,81	5	2	2,2	1,6	6	0,21	40,4
АИР132S6	5,5	85	0,8	4	2	2,2	1,6	7	0,04	57
АИР132М6	7,5	85,5	0,81	4	2	2,2	1,6	7	0,058	68
АИР160S6	11	88	0,83	3	2	2,7	1,6	6,5	0,12	100

## Окончание таблицы 16

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
АИР160М6	15	88	0,85	3	2	2,7	1,6	6,5	0,15	120
АИР180М6	18,5	89,5	0,85	2	1,8	2,4	1,6	6,5	0,2	180
АИР200М6	22	90	0,83	2	1,6	2,4	1,4	6,5	0,36	225
АИР200L6	30	90	0,85	2,5	1,6	2,4	1,4	6,5	0,4	250
АИР225М6	37	91	0,85	2	1,5	2,3	1,4	6,5	0,61	305
АИР250S6	45	92,5	0,85	2	1,5	2,3	1,4	6,5	1	390
АИР250М6	55	92,5	0,86	2	1,5	2,3	1,4	6,5	1,1	430
АИР280S6	75	92,5	0,9	2,2	1,3	2,2	1	6,5	2,9	637
АИР280М6	90	93	0,9	2,2	1,4	2,4	1	6,5	3,4	702
АИР315S6	110	93	0,92	2,3	1,4	2,3	1	6	4	847
АИР315М6	132	93,5	0,9	2,3	1,4	2,3	1	6,5	4,5	950
АИР355S6	160	94	0,9	2,2	1,6	2	1	7	7,3	1136
АИР355М6	200	94,5	0,9	2,2	1,6	2	0,9	7	8,8	1280
<b>Синхронная частота вращения 750 мин<sup>-1</sup></b>										
АИР71В8	0,25	56	0,65	8	1,8	1,9	1,4	4	0,0019	7,8
АИР80А8	0,37	60	0,61	6,5	1,8	1,9	1,4	4	0,0034	13,8
АИР80В8	0,55	64	0,63	6,5	1,8	1,9	1,4	4	0,0041	13,5
АИР90LА8	0,75	70	0,66	7	1,6	1,7	1,2	3,5	0,0067	19,7
АИР90LВ8	1,1	72	0,70	7	1,6	1,7	1,2	3,5	0,0086	22,3
АИР100L8	1,5	76	0,73	6	1,6	1,7	1,2	5,5	0,013	31,3
АИР112МА8	2,2	76,5	0,71	5,5	1,8	2,2	1,4	6	0,017	36
АИР112МВ8	3	79	0,74	5,5	1,8	2,2	1,4	6	0,025	41
АИР132S8	4	83	0,7	4,5	1,8	2,2	1,4	6	0,042	56
АИР132М8	5,5	83	0,74	5	1,8	2,2	1,4	6	0,057	70
АИР160S8	7,5	87	0,75	3	1,6	2,4	1,4	5,5	0,12	100
АИР160М8	11	87,5	0,75	3	1,6	2,4	1,4	6	0,15	120
АИР180М8	15	89	0,82	2,5	1,6	2,2	1,5	5,5	0,23	180
АИР200М8	18,5	89	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6	0,36	225
АИР200L8	22	90	0,81	2,5	1,6	2,3	1,4	6	0,4	250
АИР225М8	30	90,5	0,81	2,5	1,4	2,3	1,3	6	0,61	305
АИР250S8	37	92,5	0,78	2	1,5	2,3	1,4	6	1,1	400
АИР250М8	45	92,5	0,79	2	1,4	2,2	1,3	6	1,2	430
АИР280S8	55	92	0,86	3	1,3	2,2	1	6	3,2	643
АИР280М8	75	93	0,87	3	1,4	2,2	1	6	4,1	735
АИР315S8	90	93	0,85	1,5	1,2	2,2	1	6	4,9	927
АИР315М8	110	93	0,86	1,5	1,1	2,2	0,9	6	5,8	1001
АИР355S8	132	93,5	0,85	2	1,2	2	0,9	6,5	9	1175
АИР355М8	160	93,5	0,85	2	1,2	2	0,9	6,5	10	1280

Пример выполнения курсовой работы

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА  
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования  
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Агроэнергетический факультет

Кафедра электроснабжения

Курсовая работа  
по дисциплине «Ремонт электрооборудования»

Вариант № 201

**Тема: «Расчет обмотки статора трехфазного асинхронного  
электродвигателя с короткозамкнутым ротором при ремонте»**

Студент 3 курса \_\_\_\_\_ группы  
\_\_\_\_\_ / Соболев А. П.  
(личная подпись) (ФИО)

Шифр зачетной книжки  
1234567

Руководитель  
\_\_\_\_\_ / Селицкая О. Ю.  
(личная подпись) (ФИО)

Минск, 2018

Министерство сельского хозяйства и продовольствия  
Республики Беларусь

Учреждение образования  
Белорусский государственный аграрный технический университет

Агроэнергетический факультет  
Кафедра электроснабжения

«УТВЕРЖДАЮ»  
Зав. кафедрой  
электроснабжения

(подпись) (инициалы, фамилия)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

### ЗАДАНИЕ на курсовую работу

Студенту *Соболькову Александру Павловичу*  
курс \_\_\_\_ группа \_\_\_\_ отделение \_\_\_\_\_

#### Вариант № 201

Тема курсовой работы:

#### «РАСЧЕТ ОБМОТКИ СТАТОРА ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ ПРИ РЕМОНТЕ»

Срок сдачи законченной работы \_\_\_\_\_  
Исходные данные:

#### 1. Основной расчет\*

<i>Данные магнитопровода и его паза</i>											
Вариант	$D$ , мм	$D_a$ , мм	$l$ , мм	$z_1/z_2$ , шт	$b$ , мм	$b'$ , мм	$b_{ш}$ , мм	$h$ , мм	$e$ , мм	$\sigma$ , мм	Род изоляции
200	130	225	130	24/18	13,2	10,2	4,0	16,5	0,9	0,5	Оксидная пленка
<i>Технические условия заказчика</i>											
$n$ , мин <sup>-1</sup>			$U_{\phi}$ , В			$f$ , Гц			Схема соединения обмоток		
1500			220			50			Y/Δ		

#### 2. Задание на перерасчет

$n'$ , мин <sup>-1</sup>	$U'_{\phi}$ , В	Второй лист графической части (формат А4)
3000	127	Однослойная петлевая



**\*Примечание: размеры магнитопровода и его паза:**

$D$  – внутренний диаметр сердечника статора, мм;  $D_a$  – внешний диаметр сердечника статора, мм;  $l$  – полная длина сердечника статора, мм;  $z_1/z_2$  – число зубцов статора/число зубцов ротора;  $b$  – больший размер ширины паза, мм;  $b'$  – меньший размер ширины паза, мм;  $b_{ш}$  – ширина шлица паза, мм;  $h$  – полная высота паза, мм;  $e$  – высота усика паза, мм;  $\sigma$  – толщина листов стали, мм.

**Содержание пояснительной записки:** 1. Обмер магнитопровода и обработка полученных данных. 2. Обоснование выбора типа статорной обмотки. 3. Расчет обмоточных данных. 4. Принцип построения схемы статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя. 5. Расчет параметров обмотки:  $W_{\phi}$ ,  $W_{сек}$ ,  $N_{п.}$ . 6. Выбор изоляции паза и лобовых частей обмотки. 7. Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода. Расчет размеров секций. 8. Определение массы обмоточного провода  $G$  (кг); сопротивления обмотки одной фазы постоянному току в практически холодном состоянии  $R$  (Ом). 9. Расчет номинальных данных. 10. Перерасчеты обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей на другие параметры. 11. Расчет обмоточных данных, для построения развернутой схемы статорной обмотки по заданию на перерасчет. 12. Заключение. 13. Литература.

**Перечень графического материала:** **ЛИСТ 1 (формат А1)** – чертеж развернутой схемы двухслойной петлевой статорной обмотки с укороченным шагом по заданию основного расчета на синхронную частоту вращения магнитного поля статора  $n$  (мин<sup>-1</sup>) с указанием основных обмоточных данных и векторной диаграммы токов для принятого момента времени  $t_1$ . **ЛИСТ 2 (формат А4)** – чертеж развернутой схемы статорной обмотки в соответствии с заданием на перерасчет на синхронную частоту вращения магнитного поля статора  $n'$  (мин<sup>-1</sup>) с указанием основных обмоточных данных и векторной диаграммы токов для принятого момента времени  $t_1$ .

**Руководитель курсовой работы:** \_\_\_\_\_

**Календарный график работы:** пункты 1–4 (25 %) \_\_\_\_\_; пункт 5 (20 %) \_\_\_\_\_; пункты 6–8 (20 %) \_\_\_\_\_; пункты 9–11 (20 %) \_\_\_\_\_; пункты 12–13 (15 %) \_\_\_\_\_.

**ЛИТЕРАТУРА**

- 1 Сердешнов, А. П. Ремонт электрооборудования в 2 частях. Часть 1. Ремонт электрических машин : учебное пособие для студентов энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования / А. П. Сердешнов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2006. – 296 с.
2. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию (5-е изд. испр.) / Серия «Справочники». – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 480 с., ил.
3. Лихачев, В. Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей / В. Л. Лихачев. – М. : Солон-Р, 2004. – 240 с.

**Руководитель** \_\_\_\_\_

(подпись, дата)

(инициалы, фамилия, уч. степень, звание)

**Студент**

**принял задание к исполнению** \_\_\_\_\_

(подпись, дата)

(инициалы и фамилия студента)

Обозначение	Наименование	Кол-во	Примечание
	<u>Текстовые документы</u>		
	Расчетно-пояснительная записка	42 с.	
	<u>Чертежи</u>		
03.53.201.18ЭМ	1. Развернутая схема двухслойной петлевой статорной обмотки статорной обмотки с укороченным шагом.	A1	
03.53.201.18ЭМ	2. Развернутая схема однослойной петлевой статорной обмотки	A4	
<b>03.53.201.18 – ПЗ</b>			
<i>Расчет обмотки статора трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при ремонте</i>			
<i>Изм.</i>	<i>Кол.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>
<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		
<i>Разраб.</i>	<i>Собольков</i>		
<i>Руковод.</i>	<i>Селицкая</i>		
<i>Консульт.</i>	<i>Селицкая</i>		
<i>Н. контр.</i>			
<i>Зав. каф.</i>	<i>Збродыга</i>		
<i>Трехфазный АД с короткозамкнутым ротором</i>		<i>Лит.</i>	<i>Лист</i>
<i>Ведомость комплекта проектной документации</i>		<i>Листов</i>	
		<i>С</i>	<i>1</i>
		<i>БГАТУ, № 1234567</i>	

## РЕФЕРАТ

Курсовая работа выполнена в объеме: расчетно-пояснительная записка на 42 страницах печатного текста, таблиц – 3, рисунков – 5, графическая часть на 2 листах, в том числе формата А1 – 1 лист, формата А4 – 1 лист.

Ключевые слова: асинхронный электродвигатель переменного тока с короткозамкнутым ротором, обмоточные данные, переменный магнитный поток, вращающееся переменное магнитное поле, изоляционные материалы и обмоточные провода, номинальные данные.

В курсовой работе, в соответствии с заданием, определены площади магнитной системы, через которые проходит переменный магнитный поток, выполнены расчеты обмоточных данных, на которые выполнены развернутые схемы обмоток. Определены все основные параметры статорной обмотки трехфазного АД с короткозамкнутым ротором, выбраны оптимальные магнитные нагрузки, установлены номинальные данные электродвигателя.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение .....	7
1. Обмер магнитопровода и обработка полученных данных .....	8
2. Обоснование выбора статорной обмотки.....	13
3. Расчет обмоточных данных .....	14
4. Принцип построения схемы статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя .....	15
5. Расчет параметров обмотки $W_{\phi}$ , $N_{\text{п}}$ , $W^{(2)}_{\text{сек}}$ .....	18
6. Выбор изоляции паза и лобовых частей.....	21
7. Выбор марки и расчет сечения обмоточного провода. Расчет размеров секций.....	25
8. Определение массы обмоточного провода и сопротивления обмотки постоянному току в практически холодном состоянии .....	27
9. Расчет номинальных данных .....	28
10. Перерасчеты обмоток трехфазных асинхронных электродвигателей на другие параметры .....	31
11. Расчет обмоточных данных для построения развернутой схемы статорной обмотки по заданию на перерасчет .....	38
12. Заключение .....	41
13. Список использованных источников.....	42

					<i>03.53.201.18 – ПЗ</i>		
<i>Изм.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>			
<i>Разраб.</i>		<i>Собольков А. П.</i>			<i>Стадия</i>	<i>Лист</i>	<i>Листов</i>
<i>Провер.</i>		<i>Селицкая О. Ю.</i>				6	42
<i>Реценз.</i>		<i>Селицкая О. Ю.</i>			<i>БГАТУ, № зач.кн.</i>		
<i>Н. Контр.</i>							
<i>Утверд.</i>		<i>Збродыга В. М.</i>			<i>Пояснительная записка</i>		

## ВВЕДЕНИЕ

Трехфазные асинхронные электродвигатели с короткозамкнутым ротором являются одними из самых распространенных типов двигателей переменного тока. Они применяются для привода огромного числа механизмов в промышленности и сельском хозяйстве.

Известно, что нормируемый срок эксплуатации электрических двигателей составляет около 15 лет. В среднем же реальный срок службы асинхронных электродвигателей в специфических условиях сельского хозяйства составляет всего 2–4 года.

Вышедшие из строя электродвигатели требуют частичного или капитального ремонта, своевременность проведения которого позволяет снизить простои технологического оборудования и потери готовой продукции.

Качественное проведение ремонта невозможно без основательных знаний по технологии ремонтных работ и методике расчетов обмоточных данных электродвигателя.

Выполнение данной курсовой работы позволяет изучить методику расчета статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, знание которой позволит, в случае необходимости, самостоятельно выполнить все необходимые работы по перемотке электрической машины и суметь подобрать нужные рабочие параметры машины, соответствующие технологическому процессу.

Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

## 1 ОБМЕР МАГНИТОПРОВОДА И ОБРАБОТКА ПОЛУЧЕННЫХ ДАННЫХ

Обмер магнитопровода ремонтируемой машины (рисунок 1.1) выполняется при помощи линеек, штангенциркуля, угольников.

Для выполнения последующего расчета необходимо знать следующие размеры и данные:

$D$  – внутренний диаметр сердечника статора, мм;

$D_a$  – внешний диаметр сердечника статора, мм;

$l$  – полная длина сердечника статора, мм;

$\delta$  – толщина листов электротехнической стали, мм;

$h$  – высота паза (зубца), мм;

$e$  – высота усика паза, мм;

$z_1$  – число пазов (зубцов) статора, шт.

$n$  – частота вращения магнитного поля статора,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$f$  – частота питающей сети, Гц.

Также устанавливается род изоляции между листами электротехнической стали.

В соответствии с заданием на курсовую работу, вышеуказанные габаритные размеры и необходимые для расчета данные равны:

$D = 130$  мм;  $D_a = 225$  мм;  $l = 130$  мм;  $\delta = 0,5$  мм;  $h = 16,5$  мм;  $z_1 = 24$ ;  
 $n = 1500$   $\text{мин}^{-1}$ ;  $f = 50$  Гц;  $e = 0,9$  мм; изоляция – оксидная пленка.

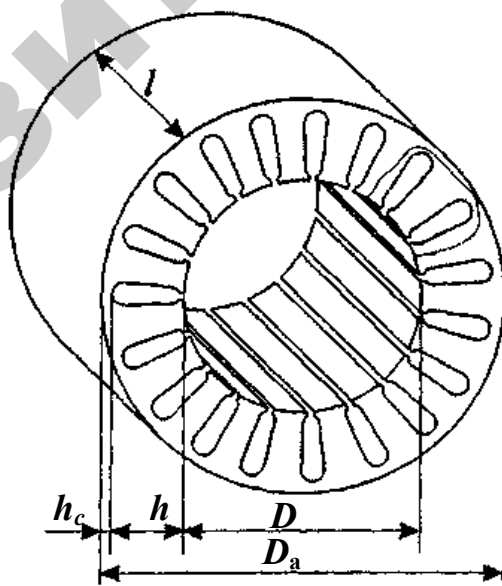


Рисунок 1.1 – Магнитопровод асинхронного двигателя с указанием основных габаритных размеров

Изм.	Колч.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

03.53.201.18 – ПЗ

Лист

8







### 1.3 Площадь поперечного сечения спинки статора

Изначально находим высоту спинки статора, которую определяем из выражения (2.13):

$$h_c = \frac{D_a - (D + 2h)}{2} = \frac{225 - 130 - 2 \cdot 16,5}{2} \cdot 10^{-3} = 31 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Площадь спинки статора, перпендикулярная магнитному потоку, определяется по формуле (2.12):

$$Q_c = h_c \cdot l_a = 31 \cdot 10^{-3} \cdot 123,5 \cdot 10^{-3} = 0,003829 \text{ м}^2.$$

### 1.4 Площадь паза в свету

Площадь паза в свету определяем для профиля «а» (рисунок 2.2):

Для определения площади паза овальной (грушевидной) формы необходимо располагать следующими размерами:

$b$  – больший размер ширины паза, мм;

$b'$  – меньший размер ширины паза, мм;

$b_{\text{ш}}$  – ширина шлица паза, мм;

$h$  – полная высота паза, мм;

$e$  – высота усика паза, мм;

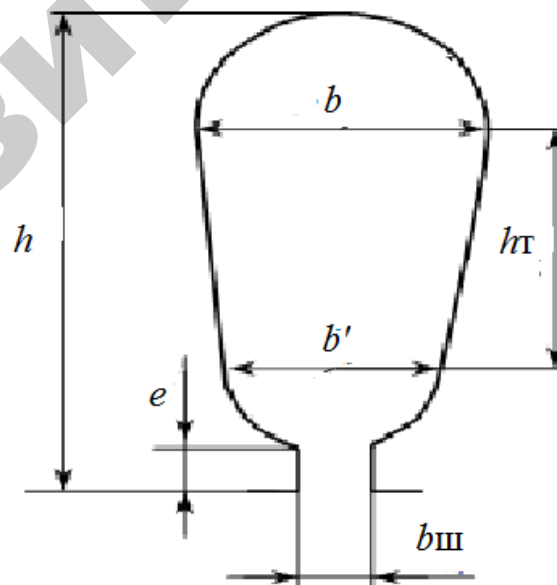


Рисунок 1.2 – Овальная форма паза статора

Согласно заданию на курсовую работу габаритные размеры для определения его площади равны:  $b = 13,4$  мм;  $b' = 10,2$  мм;  $h = 16,5$  мм;  $e = 0,9$  мм;  $b_{ш} = 4,0$  мм.

Площадь паза, имеющего грушевидную форму, принимают как сумму трех площадей: две полуокружности и трапеция.

Определяем:

– площадь полуокружности с диаметром  $b$ :

$$Q_b = \frac{\pi(b)^2}{8} = \frac{3,14 \cdot (13,4)^2}{8} = 70,48 \text{ мм}^2;$$

– площадь полуокружности с диаметром  $b'$ :

$$Q_{b'} = \frac{\pi(b')^2}{8} = \frac{3,14 \cdot (10,2)^2}{8} = 40,84 \text{ мм}^2;$$

– высоту трапеции (2.15):

$$h_m = h - e - \frac{b'}{2} - \frac{b}{2} = 16,5 - 0,9 - \frac{13,4}{2} - \frac{10,2}{2} = 3,8 \text{ мм};$$

– площадь трапеции:

$$Q_m = \frac{b + b'}{2} \cdot h_m = \frac{(10,2 + 13,4)}{2} \cdot 3,8 = 44,84 \text{ мм}^2.$$

Общая площадь паза в свету определяется по выражению (2.14):

$$Q_n = Q_b + Q_m + Q_{b'} = 40,84 + 70,48 + 44,84 = 156,2 \text{ мм}^2.$$

Результаты выполненного расчета сведем в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Результаты расчета по обработке полученных данных обмера магнитопровода

$Q_{\delta}, \text{ м}^2$	$Q_c, \text{ м}^2$	$Q_z, \text{ м}^2$	$Q_n, \text{ мм}^2$	$P, \text{ шт.}$
0,01326	0,003829	0,005126	156,16	2

						03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		12





$$N^{(2)}_{\phi} = 2P = 2 \cdot 2 = 4.$$

Число катушечных групп на три фазы (2.21):

$$N^{(2)}_{m\phi} = 2Pm = 2 \cdot 2 \cdot 3 = 12,$$

где  $(^{(2)})$  – количество слоев обмотки;

$m$  – число фаз электродвигателя (по заданию),  $m = 3$ .

Число пазов на полюс и фазу  $q$ , определяется по формуле (2.23):

$$q = \frac{z}{2 \cdot P \cdot m} = \frac{24}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 2, \text{ шт.}$$

Обмотка рассредоточенная, в катушечных группах по 2 секции.

Число электрических градусов на один паз,  $\alpha$ , эл. град., определяется по формуле (2.25):

$$\alpha = \frac{360^{\circ} \cdot P}{z} = \frac{360^{\circ} \cdot 2}{24} = 30^{\circ} \text{ эл.}$$

До выбора сечения обмоточного провода, предварительно принимаем число параллельных ветвей  $a = 1$ .

#### 4 ПРИНЦИП ПОСТРОЕНИЯ СХЕМЫ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

Начало первой секции первой катушечной группы фазы «А» помещаем в паз, принятый за первый.

По условию получения вращающегося переменного магнитного поля, фазные обмотки должны быть смещены в пространстве относительно друг друга на угол, равный  $120^{\circ}$  эл.

Сдвиг в пазах между обмотками относительно фазы «А» определяется по формулам (2.29) и (2.30):

$$B = \frac{120^{\circ}}{\alpha} = \frac{120^{\circ}}{30^{\circ}} = 4;$$

								03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата				15



Третья катушечная группа займет пазы 17 и 22, 18 и 23;

Четвертая катушечная группа займет пазы 23 и 4, 24 и 5.

*Внутрифазное соединение для фазы «В»:*

Начало фазы «В», паз 5 –  $V1$ .

Соединяем начала 11 и 17.

Соединяем концы 11 и 17, 23 и 5.

Конец фазы «В», паз 23 –  $V2$ .

*Построение фазы «С».* Начало первой секции первой катушечной группы фазы «С» должно располагаться, как было рассчитано выше, относительно фазы «А» через 8 пазов, то есть с 9-го. Внутрифазное размещение катушечных групп также должно быть выполнено по аналогии с фазами «А» и «В»:

Первая катушечная группа фазы «С» займет пазы 9 и 14, 10 и 15;

Вторая катушечная группа займет пазы 15 и 20, 16 и 21;

Третья катушечная группа займет пазы 21 и 2, 22 и 3;

Четвертая катушечная группа займет пазы 3 и 8, 4 и 9.

*Внутрифазное соединение для фазы «С»:*

Начало фазы «С», паз 9 –  $W1$ .

Соединяем начала 15 и 21.

Соединяем концы 15 и 21, 3 и 9.

Конец фазы «С», паз 3 –  $W2$ .

Полностью выполненная двухслойная статорная обмотка с укороченным шагом при  $z = 24$  и  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$  показана на рисунке 4.1 (Лист № 1 графической части).

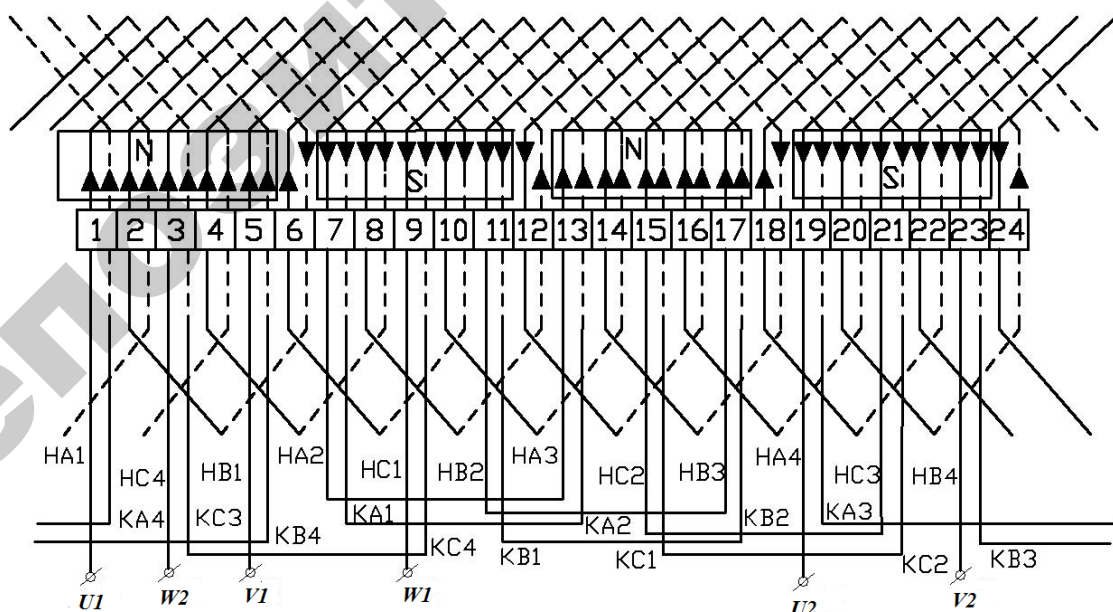


Рисунок 4.1 – Развернутая схема двухслойной статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя с укороченным шагом при  $z = 24$  и  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$

						03.53.201.18 – ПЗ	Лист
							17
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

## 5. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ ОБМОТКИ $W_\Phi$ , $N_{\Pi}$ , $W^{(2)}_{СЕК}$

Для проведения данного расчета задаемся значением магнитной индукции для рассматриваемого электродвигателя по таблице 2.5, исходя из:

- мощности электродвигателя;
- класса нагревостойкости изоляции;
- условий эксплуатации;
- состояния машины.

Мощность, тип обмотки, условия эксплуатации, состояние электродвигателя были определены и приняты ранее в п. 2 данного примера.

Класс нагревостойкости изоляции зависит от высоты оси вращения электродвигателя. По найденной полной мощности  $S_{дв} \approx 4$  кВА (см. п. 2) и синхронной частоте вращения магнитного поля статора  $n = 1500$  мин<sup>-1</sup> (задание на КР), с учетом  $\cos\phi$  и КПД [2] :  $h \approx 100$  мм. Для диапазона высот осей вращения 71–132 мм, изоляция электродвигателей выполняется класса В [3].

С учетом вышеизложенного, принимаем магнитную индукцию в воздушном зазоре  $B_\delta = 0,7$  Тл.

Магнитный поток  $\Phi$ , Вб, в воздушном зазоре определяем по формуле (2.51):

$$\Phi = \frac{2}{\pi} B_\delta Q_\delta = \frac{2}{3,14} \cdot 0,7 \cdot 0,01326 = 0,00592 \text{ Вб.}$$

Действительный коэффициент укорочения шага  $K_y$  определяется (2.44):

$$K_y = \sin\left(90^\circ \cdot \frac{y}{y'}\right) = \sin\left(90^\circ \cdot \frac{5}{6}\right) = 0,966.$$

Коэффициент распределения  $K_p$  определяем по формуле (2.43):

$$K_p = \frac{\sin(\alpha q / 2)}{q \sin(\alpha / 2)} = \frac{\sin\left(\frac{30^\circ}{2} \cdot 2\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 0,966.$$

Обмоточный коэффициент определяется по выражению (2.45):

$$K_{об} = K_p K_y = 0,966 \cdot 0,966 = 0,933.$$

								Лист
								18
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	03.53.201.18 – ПЗ		



Определяем количество витков в обмотке одной фазы  $W_\phi$  по выражению (2.47):

$$W_\phi = \frac{0,97U_\phi}{4,44f\Phi K_{об}} = \frac{0,97 \cdot 220}{4,44 \cdot 50 \cdot 5,92 \cdot 10^{-3} \cdot 0,933} = 174,18 \text{ шт.}$$

Так как обмотка необходима равносекционная, а часть витка невозможно уложить в пазы магнитопровода, округляем число витков до ближайшего целого четного числа:  $W_\phi = 174$  шт.

Число активных проводников в пазу  $N_\pi$ , шт., определяется по формуле (2.52):

$$N_\pi = \frac{2W_\phi ma}{z} = \frac{2 \cdot 174 \cdot 3 \cdot 1}{24} = 43,5 \text{ шт.}$$

Так как обмотка двухслойная, полученное значение числа активных проводников в одном пазу округляем до ближайшего целого четного числа:  $N_\pi = 44$ .

Уточняем число витков на фазу, используя выражение (2.53):

$$W_\phi'' = \frac{N_\pi z}{2ma} = \frac{44 \cdot 24}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 176.$$

Определим величину магнитного потока, соответствующего уточненному числу витков по формуле (2.54):

$$\Phi'' = \frac{0,97U_\phi}{4,44f K_{об} W_\phi''} = \frac{0,97 \cdot 220}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,933 \cdot 176} = 5,85 \cdot 10^{-3}, \text{ Вб.}$$

Индукцию на участках цепи, Тл, определяем по выражениям (2.55–2.57):

$$B_\delta = \frac{\Phi''}{\frac{2}{\pi} \cdot Q_\delta} = \frac{5,85 \cdot 10^{-3}}{\frac{2}{3,14} \cdot 0,01326} = 0,693 \text{ Тл.}$$

$$B_z = \frac{\Phi''}{\frac{2}{\pi} \cdot Q_z} = \frac{5,85 \cdot 10^{-3}}{\frac{2}{3,14} \cdot 0,005126} = 1,794 \text{ Тл.}$$

								03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата				19



## 6 ВЫБОР ИЗОЛЯЦИИ ПАЗА И ЛОБОВЫХ ЧАСТЕЙ ОБМОТКИ

Электрическая изоляция обмотки является одним из важнейших элементов электрической машины, от которой в значительной степени зависит надежность в эксплуатации. Поэтому при выборе марки и толщины электроизоляционных материалов, кроме номинальных параметров необходимо учитывать комплекс факторов, сопровождающих работу электродвигателя. Это нагрузка машины, режим и условия ее работы, температура и чистота окружающей среды.

Условия эксплуатации рассчитываемого электродвигателя (пункт 2) и класс нагревостойкости изоляции (пункт 5) приняты ранее. Классу нагревостойкости  $B$  соответствует температура  $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

### 6.1 Изоляция пазы

#### 6.1.1 Пазовая гильза

Основное назначение изоляции – предотвращение замыкания обмотки на корпус электродвигателя. Изоляционные материалы должны обладать высокой электрической и механической прочностью и не разрушаться при укладке секций обмотки.

Изоляция пазовой гильзы выполняется из трех слоев диэлектриков (рисунки 6.1):

- *первый слой*, укладываемый на дно пазы, предназначен для защиты второго слоя от повреждения листами электротехнической стали, то есть назначение этого слоя – обеспечение требуемой механической прочности;
- *второй слой* по назначению является основной электрической изоляцией;
- *третий слой* по своему назначению служит защитой второго слоя от повреждений активными проводниками, помещаемыми в паз, то есть обеспечивает требуемую механическую прочность.

С учетом вышеизложенного, принимаем:

*первый слой* – пленкосинтокартон ПСК-ЛП,  $\delta_1 = 0,3\text{ мм}$ ,  $E_{\text{пр}1} = 40\text{ кВ/мм}$ ;

*второй слой* – синтетическая пленка ПЭТ-Э,  $\delta_2 = 10\text{ мкм}$ ,  $E_{\text{пр}2} = 120\text{ кВ/мм}$ ;

*третий слой* – пленкосинтокартон ПСК-ЛП,  $\delta_3 = 0,25\text{ мм}$ ,  $E_{\text{пр}3} = 40\text{ кВ/мм}$ .

Электрическая прочность слоя  $E_{\text{пр}i}$ , кВ, определяется по формуле (2.69):

$$E_{i_{\text{сл}}} = E_{\text{пр}i} \cdot \delta_i.$$

						03.53.201.18 – ПЗ	Лист
							21
Изм.	Кол.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		



### 6.1.2 Межслоевая прокладка

Основное назначение изоляции – предотвращение междуфазного и межсекционного замыканий обмотки электродвигателя. Материалы должны обладать высокой электрической, а также механической прочностью и не разрушаться при укладке второго слоя.

Изоляция межслойной прокладки выполняется из трех слоев диэлектриков, склеенных лаком:

*первый слой* – механическая защита второго слоя изоляции от повреждения активными проводниками первого слоя обмотки;

*второй слой* – основная электрическая изоляция;

*третий слой* – механическая защита второго слоя изоляции от повреждения активными проводниками второго слоя обмотки.

С учетом вышеизложенного, принимаем:

*первый слой* – пленкосинтокартон ПСК-ЛП,  $\delta_1 = 0,25$  мм,  $E_{пр1} = 40$  кВ/мм;

*второй слой* – стеклоткань ЛСБ 120/130,  $\delta_2 = 0,15$  мм,  $E_{пр2} = 4$  кВ/мм;

*третий слой* – пленкосинтокартон ПСК-ЛП,  $\delta_3 = 0,25$  мм,  $E_{пр3} = 40$  кВ/мм.

Найдем электрическую прочность каждого слоя по формуле (2.69):

$$E_{1_{сл}} = 40 \cdot 0,25 = 10, \text{ кВ.}$$

$$E_{2_{сл}} = 4 \cdot 0,15 = 0,6, \text{ кВ.}$$

$$E_{3_{сл}} = 40 \cdot 0,25 = 10, \text{ кВ.}$$

Электрическую прочность изоляции  $E_{пр}$ , кВ определяем по формуле (2.68):

$$\sum_{i=1}^n E_{пр} = E_{1_{сл}} + \dots + E_{n_{сл}} = 10 + 0,6 + 10 = 20,6 \text{ кВ.}$$

Проверку электрической прочности изоляции проводим по условию (2.70):

$$20,6 > 1,44.$$

Условие выполняется.

### 6.1.3 Изоляция паза у расточки статора

Прокладка под клин предназначена для предотвращения механического повреждения и перемещения пазовой гильзы при проталкивании клина. Материал должен обладать высокой механической прочностью.

							03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			23

С учетом вышеизложенного, принимаем для прокладки картон электроизоляционный ЭВТ,  $\delta = 0,5$  мм.

Клин предназначен для уплотнения и фиксирования активных проводников обмотки в пазу. Материал должен обладать высокой твердостью и механической прочностью. В качестве материала для клина принимаем стеклотекстолит СТ,  $\delta = 0,5$  мм.

### 6.2 Изоляция лобовых частей

Назначение междуфазных прокладок – предотвращение замыкания соседних катушек, принадлежащих разным фазам.

Длина междуфазных прокладок определяется шагом обмотки, а ширина – вылетом лобовых частей. Форма прокладок должна повторять форму лобовых частей обмотки с припуском 5–7 мм по всему контуру.

Принимаем трехслойную конструкцию прокладок, слои склеиваются лаком:

*первый слой* – механическая защита вторым проводом нижней катушки;

*второй слой* – основная электрическая изоляция;

*третий слой* – механическая защита вторым проводом верхней катушки.

С учетом вышеизложенного, принимаем:

*первый слой* – пленкоасбестокартон,  $\delta_1 = 0,3$  мм,  $E_{пр1} = 25$  кВ/мм;

*второй слой* – стеклоткань ЛСБ 120/130,  $\delta_2 = 0,15$  мм,  $E_{пр2} = 4$  кВ/мм;

*третий слой* – пленкоасбестокартон,  $\delta_3 = 0,3$  мм,  $E_{пр3} = 25$  кВ/мм.

Найдем электрическую прочность каждого слоя по формуле (2.69):

$$E_{1\text{сл}} = 25 \cdot 0,3 = 7,5, \text{ кВ.}$$

$$E_{2\text{сл}} = 4 \cdot 0,15 = 0,6, \text{ кВ.}$$

$$E_{3\text{сл}} = 25 \cdot 0,3 = 7,5, \text{ кВ.}$$

Электрическую прочность изоляции  $E_{пр}$ , кВ определяем по формуле (2.68):

$$\sum_{i=1}^n E_{пр} = E_{1\text{сл}} + \dots + E_{n\text{сл}} = 7,5 + 0,6 + 7,5 = 15,6 \text{ кВ.}$$

Проверку электрической прочности изоляции проводим по условию (2.70):

$$15,6 > 1,44.$$

Условие выполняется.

						03.53.201.18 – ПЗ	Лист
							24
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

В качестве механической защиты и закрепления лобовых частей обмотки принимаем стеклянную электроизоляционную ленту ЛЭС,  $\delta = 0,1$  мм, ширина 15 мм. Лента накладывается в полнахлеста.

Для увязки и бандажировки лобовых частей обмотки принимаем шнур-чулок стеклянный АСЭЧ ( $\delta$ ) – 2,0. Чулок накладывается в разбежку.

### 6.3 Изоляция внутримашинных соединений

Назначение изоляции – механическая защита мест соединений и выходных концов. Материал должен обладать механической прочностью и эластичностью.

В местах, где нет механического воздействия при увязке схемы, принимаем электроизоляционную трубку ТЭС: толщина стенки 0,5 мм, внутренний диаметр 1,5 мм.

В местах, где имеется механическое воздействие, принимаем электроизоляционную трубку ТРФ: толщина стенки 0,6 мм, внутренний диаметр 1,7 мм.

## 7 ВЫБОР МАРКИ И РАСЧЕТ СЕЧЕНИЯ ОБМОТОЧНОГО ПРОВОДА. РАСЧЕТ РАЗМЕРОВ СЕКЦИЙ

Выбор марки обмоточного провода производится по параметрам, изложенным выше (пункт 6), для выбора изоляции.

В соответствии с классом нагревостойкости принимаем провод марки ПЭТВ-2.

### 7.1 Расчет сечения и диаметра обмоточного провода

Расчетное сечение провода без изоляции  $P'_p$ , мм<sup>2</sup>, определяется по формуле (2.71):

$$P'_p = \frac{Q_{\text{п}} \cdot K_{\text{м}}}{N_{\text{п}}} = \frac{156,16 \cdot 0,4}{50} = 1,25, \text{ мм}^2,$$

где  $K_{\text{м}}$  – коэффициент заполнения паза медью, принимаем по таблице 2.8.

Диаметр провода без изоляции  $d'$  мм, определяется по формуле (2.72):

$$d' = \sqrt{\frac{4 \cdot P'_p}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 1,25}{3,14}} = 1,26 \text{ мм}.$$

							03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Кол.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			25







где  $\rho$  – удельное сопротивление проводникового материала,  $\frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}$ , для

$$\text{меди } \rho = 0,0172 \frac{\text{Ом} \cdot \text{мм}^2}{\text{м}}.$$

$$R = 0,0172 \cdot \frac{0,579 \cdot 200}{1,23 \cdot 1 \cdot 1} = 1,62 \text{ Ом}.$$

Принимаем к монтажу провод

$$\text{ПЭТВ} - 2 \times 1,23 \times 1 \times \frac{1,25}{1,35}.$$

## 9 РАСЧЕТ НОМИНАЛЬНЫХ ДАННЫХ

К расчетным номинальным данным асинхронного электродвигателя относятся следующие величины:

$U_n$  – номинальное напряжение, В (задание);

$I_n$  – номинальный ток, А;

$P_n$  – номинальная мощность, кВт;

$f_n$  – номинальная частота тока, Гц (задание);

$n_n$  – номинальная частота вращения ротора,  $\text{мин}^{-1}$ ;

$\cos \varphi_n$  – номинальный коэффициент мощности;

$\eta_n$  – номинальный коэффициент полезного действия (КПД);

Y/ $\Delta$  – схема соединения обмотки (задание).

### 9.1 Определение номинального тока

Номинальный фазный ток электродвигателя  $I_{\text{нф}}$ , А, определяется по формуле (2.82):

$$I_{\text{нф}} = j \cdot \Pi_{\text{гост}} \cdot a \cdot a',$$

где  $j$  – плотность тока,  $\text{А}/\text{мм}^2$ ;  $j = 6 \text{ А}/\text{мм}^2$  (таблица 2.10):

$$I_{\text{нф}} = 6 \cdot 1,23 \cdot 1 \cdot 1 = 7,38 \text{ А}.$$

							03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			28

Линейная нагрузка электродвигателя  $A$ , А/м, определяется по формуле (2.83):

$$A = \frac{I_{\text{нф}} \cdot N_{\text{п}} \cdot z}{\pi \cdot D \cdot a},$$

$$A = \frac{7,38 \cdot 50 \cdot 24}{3,14 \cdot 130 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 21,70 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

Так как линейная нагрузка не соответствует допустимым пределам, то  $A = (25 - 30) \cdot 10^{-3}$  А/м (таблица 2.10), необходимо увеличить плотность тока и провести перерасчет.

С учетом состояния машины (пункт 2), принимаем  $j = 8$  А/мм<sup>2</sup>. По формуле (2.82) определяем номинальный фазный ток:

$$I_{\text{нф}} = 8 \cdot 1,23 \cdot 1 \cdot 1 = 9,84 \text{ А.}$$

По формуле (2.83) пересчитываем линейную нагрузку  $A$ :

$$A = \frac{9,84 \cdot 50 \cdot 24}{3,14 \cdot 130 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 28,93 \cdot 10^3 \text{ А/м.}$$

Линейная нагрузка входит в допустимые пределы (таблица 2.10).

## 9.2 Определение номинальной мощности

Полная мощность, потребляемая из сети,  $S_{\text{дв}}$ , кВА, определяется по формуле (2.84):

$$S_{\text{дв}} = m \cdot I_{\text{нф}} \cdot U_{\text{нф}} \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 9,84 \cdot 220 \cdot 10^{-3} = 6,5 \text{ кВА}$$

Активная мощность,  $P_{\text{дв}}$ , кВт, определяется по формуле (2.85):

$$P_{\text{дв}} = m \cdot I_{\text{нф}} \cdot U_{\text{нф}} \cdot 10^{-3} \cdot \cos \varphi_{\text{н}} = S_{\text{дв}} \cdot \cos \varphi_{\text{н}},$$

где  $\cos \varphi_{\text{н}}$  – коэффициент мощности электродвигателя, с учетом приближенной полной мощности (пункт 2) и номинальной частоты вращения магнитного поля (задание), принимаем  $\cos \varphi_{\text{н}} = 0,83$  (таблица 2.11):

$$P_{\text{дв}} = 6,5 \cdot 0,83 = 5,39 \text{ кВт.}$$

						03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		29

Расчетная номинальная мощность,  $P'_H$ , кВт, определяется по формуле (2.86):

$$P'_H = 3I_{\text{нф}} U_{\text{нф}} \cos \varphi_{\text{н}} \eta_{\text{н}} \cdot 10^{-3}, \text{ кВт}, \approx P_{\text{дв}} \cdot \eta_{\text{н}};$$

где  $\eta_{\text{н}}$  – КПД электродвигателя.

С учетом вышеизложенного, принимаем  $\eta_{\text{н}} = 0,8$  (таблица 2.11):

$$P'^{(3)}_H = 4,793 \cdot 0,8 = 4,31 \text{ кВт}.$$

По полученному расчетному значению, принимаем ближайшую стандартную номинальную мощность [2, таблица 7.6.1]:  $P_{\text{нГОСТ}} = 4 \text{ кВт}$ , энергетические показатели –  $\cos \varphi_{\text{ГОСТ}} = 0,84$ ,  $\eta_{\text{ГОСТ}} = 85 \%$ ; АИР100L4.

Номинальный фазный ток  $I_{\text{н(ГОСТ)}}$ , А, определяется по формуле (2.87):

$$I_{\text{нф(ГОСТ)}} = \frac{P_{\text{н}} \cdot 10^3}{3U_{\text{нф}} \cos \varphi_{\text{н}}}.$$

$$I_{\text{нф(ГОСТ)}} = \frac{4 \cdot 10^3 \cdot 100}{3 \cdot 220 \cdot 0,84 \cdot 85} = 8,59 \text{ А}.$$

По формуле (2.83) найдем линейную нагрузку:

$$A = \frac{8,59 \cdot 50 \cdot 24}{3,14 \cdot 130 \cdot 10^{-3} \cdot 1} = 23,22 \cdot 10^3 \text{ А/м}.$$

Линейная нагрузка не соответствует допустимым пределам, но повышение номинальной мощности на ступень даст превышение линейной нагрузки сверхдопустимых норм.

Фактическая плотность тока  $j_{\phi}$ , А/мм<sup>2</sup> (2.89):

$$j_{\phi} = \frac{I_{\text{нф(ГОСТ)}}}{\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'}.$$

$$j_{\phi} = \frac{8,59}{1,09 \cdot 1 \cdot 1} = 7,85 \text{ А/мм}^2.$$

							03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колч.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			30

## 10 ПЕРЕРАСЧЕТЫ ОБМОТОК ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ НА ДРУГИЕ ПАРАМЕТРЫ

### 10.1 Перерасчет обмотки на другое напряжение

Так как параметры старой обмотки известны, проведем перерасчет. Перерасчет обмотки можно производить согласно методике, приведенной в пункте 2.10 данных методических указаний по формулам (2.90–2.95).

Определим новые параметры обмотки:

– число витков в обмотке одной фазы:

$$W_{\text{фн}} = W_{\text{фс}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{с}}} = 200 \frac{127}{220} = 115,47 \text{ шт.}$$

Округляем до ближайшего целого и четного числа  $W_{\text{фн}} = 116$ ;

– число активных проводников в одном пазу:

$$N_{\text{пн}} = N_{\text{пс}} \cdot \frac{U_{\text{н}}}{U_{\text{с}}} = 50 \cdot \frac{127}{220} = 28,86 \text{ шт.}$$

Округляем до ближайшего целого и четного числа:  $N_{\text{пн}} = 28$ .

Уточняем количество витков в фазе по формуле:

$$W'_{\text{ф}} = \frac{N_{\text{пн}} \cdot z}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{28 \cdot 24}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 112;$$

– число витков в одной секции:

$$W_{\text{сек}}^{(2)} = \frac{N_{\text{пн}}}{2} = \frac{28}{2} = 14;$$

– *выбираем марку и сечение обмоточного провода:* так как в нашем случае перерасчет делается с переходом на более низкий уровень напряжения, и условия работы для электродвигателя, принятые нами ранее, останутся без изменений, изоляция на проводе может остаться прежней, поэтому мы можем оставить выбранную ранее марку провода ПЭТВ-2;

– *новое сечение обмоточного провода:*

$$I'_{\text{рн}} = I'_{\text{рс}} \frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{н}}} = 1,23 \frac{220}{127} = 2,13 \text{ мм}^2;$$

							03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колч.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			31

– диаметр провода с изоляцией для новой обмотки:

$$d_{\text{н}} = d_{\text{с}} \cdot \sqrt{\frac{U_{\text{с}}}{U_{\text{н}}}} = 1,35 \sqrt{\frac{220}{127}} = 1,77 \text{ мм.}$$

По [1, приложение 7, таблица 5] принимаем провод с параметрами:  
 $d'_{\text{ГОСТ}} = 1,7 \text{ мм}$ ;  $d_{\text{ГОСТ}} = 1,81 \text{ мм}$ ;  $\Pi_{\text{ГОСТ}} = 2,57 \text{ мм}^2$ ;  $\Pi'_{\text{ГОСТ}} = 2,26 \text{ мм}^2$ .

Возможность укладки провода в паз проверяется по условию (2.73):

$$d_{\text{ГОСТ}} < b_{\text{ш}} - (1,5 \dots 2,0),$$

где  $b_{\text{ш}}$  – ширина шлица паза, мм (задание).

$$1,81 < 4,0 - (1,5 \dots 2,0).$$

Условие (2.73) выполняется.

Все обмоточные данные и параметры витка секции остаются неизменными, а также не меняется и номинальная мощность электродвигателя;

– сопротивление обмотки одной фазы в холодном состоянии определяем по формуле (2.80):

$$R = \rho \cdot \frac{l_{\text{в}} \cdot W_{\text{Ф}}}{\Pi_{\text{ГОСТ}} \cdot a \cdot a'} = 0,0172 \frac{0,579 \cdot 112}{2,26 \cdot 1 \cdot 1} = 0,49 \text{ Ом.}$$

Принимаем к монтажу провод

$$\text{ПЭТВ} - 2 \times 2,26 \times \frac{1,7}{1,81}.$$

### 10.2 Перерасчет обмотки на другую частоту вращения

Данный перерасчет необходимо начинать с проверки возможности использования данного магнитопровода техническому заданию на новую частоту вращения переменного магнитного поля в расточке статора. Связано это с тем, что при переходе на новую частоту вращения может наблюдаться «прилипание» ротора в момент пуска, «застревание» ротора (при переходе на пониженную частоту по отношению к начальной частоте вращения) и «повышенный шум» при работе машины.

						03.53.201.18 – ПЗ	Лист
Изм.	Колч.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		32



$$z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm 1,$$

$$z_2 \neq 2p \cdot 3i \pm (2p + 1).$$

$$18 \neq 2p \cdot 3i \pm 1 \neq 2 \cdot 1 \cdot 3i \pm 1 \neq 2 \cdot 3i \pm 1,$$

$$18 \neq 2p \cdot 3i \pm (2p + 1) \neq 2 \cdot 1 \cdot 3i \pm (2 \cdot 1 + 1) \neq 2 \cdot 3i \pm 3.$$

Данные условия выполняются.

Вывод: несмотря на то, что выполненные проверки на *застревание* ротора и на наличие *повышенного шума* при работе машины удовлетворяют поставленным условиям, проверка на *прилипание ротора при пуске* полностью не прошла, так как при  $i = 3$  условие  $z_2 \neq 2p3i$  не выполняется. Следовательно, новая обмотка на  $n_n = 3000 \text{ мин}^{-1}$  при  $z_2 = 18$  на данном магнитопроводе невыполнима.

Так как перерасчет обмотки проводится на частоту вращения большую заданной,  $3000 > 1500$ , то есть  $n_n > n_c$ , то для перерасчета воспользуемся выражениями (2.99–2.100):

– число витков в одной секции новой обмотки:

$$W_{\text{сек}_n}^{(2)} = W_{\text{сек}_c}^{(2)} \cdot \frac{n_c}{n_n \cdot k_{\text{п}}} = 25 \frac{1500}{3000 \cdot 0,8} = 15,6 \approx 16.$$

В двухслойной обмотке при  $W_{\text{сек}}^{(2)} = 16$  число активных проводников в одном пазу  $N_{\text{п}} = 32$ . Уточняем число витков на одну фазу по формуле

$$W_{\text{ф}}' = \frac{N_{\text{п}} \cdot z}{2 \cdot m \cdot a} = \frac{32 \cdot 24}{2 \cdot 3 \cdot 1} = 112 \text{ шт};$$

– определяем сечение обмоточного провода:

$$I_{\text{пн}}' = I_c' \cdot \frac{n_n \cdot k_{\text{п}}}{n_c} = 1,23 \frac{3000 \cdot 0,8}{1500} = 1,96 \text{ мм}^2.$$

Так как заданием не предусмотрены условия работы электродвигателя, то оставляем выбранную ранее марку обмоточного провода ПЭТВ-2. Находим диаметр обмоточного провода, исходя из полученного сечения  $I_{\text{пн}}'$ :

								Лист
								34
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата	03.53.201.18 – ПЗ		







– новая мощность электродвигателя после перерасчета обмотки на частоту вращения магнитного поля статора  $n_n = 3000 \text{ мин}^{-1}$  находим по формуле (2.100):

$$P_n = P_c \cdot \frac{n_n \cdot k_n}{n_c} = 4 \frac{3000 \cdot 0,8}{1500} = 6,4 \text{ кВт}.$$

Полученное значение номинальной мощности находится между стандартными значениями номинальных мощностей 5,5 кВт и 7,5 кВт. Учитывая вышеприведенный расчет номинальных данных для заданной частоты вращения магнитного поля статора  $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$ , чтобы не допустить превышения допустимых норм по линейной нагрузке, примем к рассмотрению номинальную стандартную мощность  $P_n = 5,5 \text{ кВт}$ .

Согласно основному расчету составляем задание обмотчику (таблица 10.1).

Таблица 10.1 – Задание обмотчику

№	Наименование	Статор
1	Тип двигателя	АИР100L4
2	Номинальная мощность, кВт	4
3	Номинальное напряжение, В	127/220
4	Номинальный ток, А	14,7/8,6
5	Номинальная частота вращения, $\text{мин}^{-1}$	1500
6	Частота тока, Гц	50
7	Схема соединения обмоток	$\Delta/Y$
8	$\cos\varphi$	0,84
9	$\eta, \%$	85
10	Тип обмотки	Петлевая, двухслойная
11	Масса провода, кг	4,64
12	Марка и сечение провода	$ПЭТВ - 2 \times 1,23 \times \frac{1,25}{1,35}$
13	Число параллельных сечений, шт	1
14	Число витков в секции	25
15	Число секций в катушке	2
16	Длина витка, м	0,58
17	Количество катушек, шт	12
18	Шаг обмотки	5
19	Число параллельных ветвей	1

## 11 РАСЧЕТ ОБМОТОЧНЫХ ДАННЫХ ДЛЯ ПОСТРОЕНИЯ РАЗВЕРнуТОЙ СХЕМЫ СТАТОРНОЙ ОБМОТКИ ПО ЗАДАНИЮ НА ПЕРЕРАСЧЕТ

*Шаг обмотки* (полюсное деление, выраженное числом зубцов), определяем по формуле (2.16):

$$y' = \frac{Z}{2 \cdot 1} \pm \varepsilon = \frac{24}{2 \cdot 1} + 0 = 12,$$

где  $\varepsilon$  – произвольное целое число ( $0 < \varepsilon < 1$ ), доводящее  $y'$  до ближайшего целого числа.

*Число катушечных групп*  $N_{\phi}^{(1)}$ , шт., на одну фазу определяем по формуле (2.18):

$$N_{\phi}^{(1)} = P = 1.$$

*Число катушечных групп на три фазы* (2.19):

$$N_{m\phi}^{(1)} = P \cdot m = 1 \cdot 3 = 3,$$

где  $^{(1)}$  – количество слоев обмотки;

$m$  – число фаз электродвигателя (по заданию),  $m = 3$ .

*Число пазов на полюс и фазу*  $q$ , определяется по формуле (2.23):

$$q = \frac{z}{2 \cdot P \cdot m} = \frac{24}{2 \cdot 1 \cdot 3} = 4, \text{ шт.}$$

Обмотка рассредоточенная, в катушечных группах по 4 секции.

*Число электрических градусов на один паз*,  $\alpha$ , эл. град., определяется по формуле (2.25):

$$\alpha = \frac{360^\circ \cdot P}{z} = \frac{360^\circ \cdot 1}{24} = 15^\circ \text{эл.}$$

До выбора сечения обмоточного провода предварительно принимаем число параллельных ветвей:  $a = 1$ .

							03.53.201.18 – ПЗ	Лист
								38
Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата			



фазы «А» через 16 пазов, то есть с 17-го. На фазу «С» приходится также одна катушечная группа, которая займет пазы: 17 и 5, 18 и 6, 19 и 7, 20 и 8.

Начало фазы «С», паз 17 –  $W1$ .

Конец фазы «С», паз 8 –  $W2$ .

Полностью выполненная однослойная петлевая статорная обмотка при  $z = 24$  и  $n' = 3000 \text{ мин}^{-1}$  показана на рисунке 11.1 (Лист № 2 графической части).

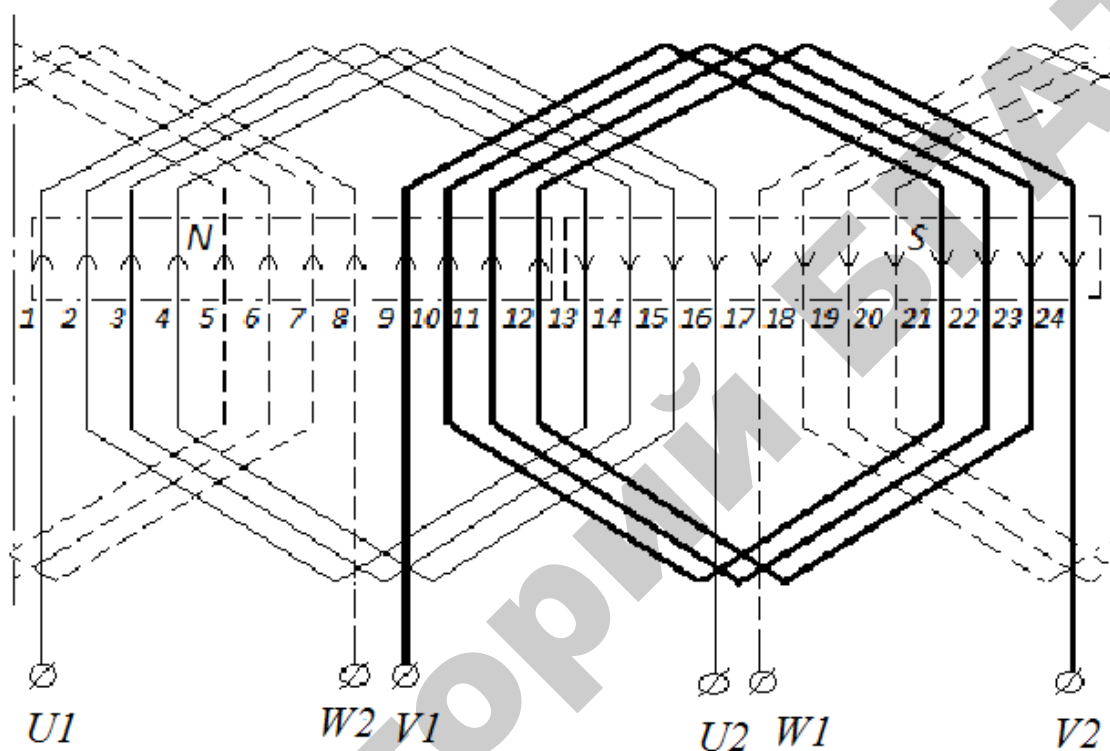


Рисунок 11.1 – Развернутая схема однослойной петлевой статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя при  $z = 24$  и  $n' = 3000 \text{ мин}^{-1}$

Изм.	Колич.	Лист	№ док.	Подпись	Дата

03.53.201.18 – ПЗ

Лист

40

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В курсовой работе была освоена методика расчета статорной обмотки трехфазного асинхронного электродвигателя при отсутствии паспортных и обмоточных данных, при которых электродвигатель эксплуатировался до ремонта.

Согласно техническому заданию, был произведен расчет магнитной системы машины, поступившей в ремонт, определены обмоточные данные для построения схемы обмотки, выбраны изоляционные материалы и обмоточный провод для изготовления обмотки, соответствующие предложенным рабочим параметрам машины и ее условиям эксплуатации.

В процессе расчета была выявлена взаимосвязь между основными параметрами электродвигателя, найдено решение по определению оптимального варианта значений электромагнитных нагрузок и по номинальным данным машины, составлено задание обмотчику.

						03.53.201.18 – ПЗ	Лист
							41
Изм.	Кол.	Лист	№ док.	Подпись	Дата		

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Сердешнов, А. П. Ремонт электрооборудования в 2 частях. Часть 1. Ремонт электрических машин : учебное пособие для студентов энергетических специальностей учреждений, обеспечивающих получение высшего образования / А. П. Сердешнов. – Минск : ИВЦ Минфина, 2006. – 296 с.

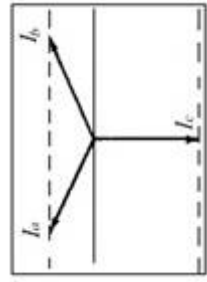
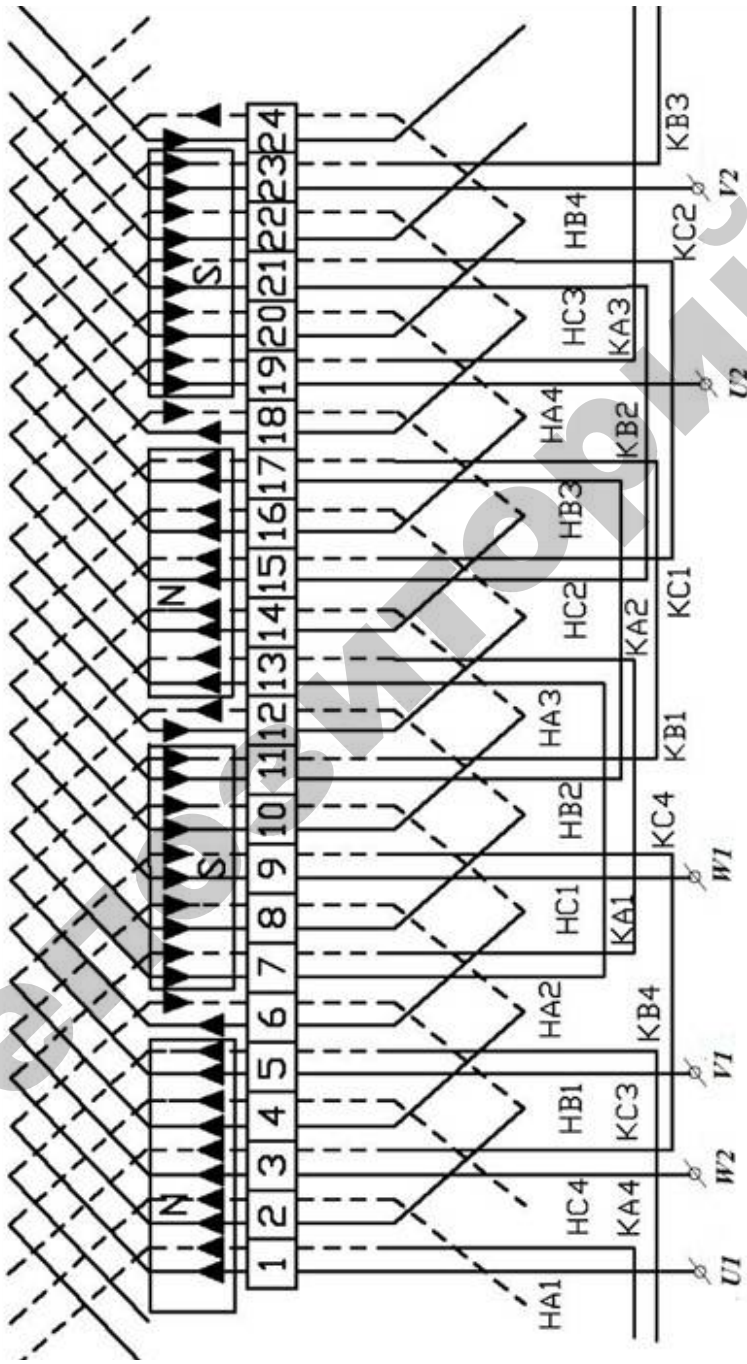
2. Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию (5-е изд. испр.) / И. И. Алиев. – Ростов н/Д : Феникс, 2004. – 480 с., ил. – (Серия «Справочники»).

3. Лихачев, В. Л. Справочник обмотчика асинхронных электродвигателей / В. Л. Лихачев. – М. : Солон-Р, 2004. – 240 с.

4. Общие требования к организации проектирования и правила оформления дипломных и курсовых проектов (работ) : учебно-методическое пособие / В. В. Гурин, Е. С. Якубовская, И. П. Матвеевко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2014. – 144 с.

						03.53.201.18 – ПЗ	Лист
							42
<i>Изм.</i>	<i>Колич.</i>	<i>Лист</i>	<i>№ док.</i>	<i>Подпись</i>	<i>Дата</i>		





$y = 5, N_{1\phi}^{(2)} = 12, q = 2, \alpha = 30^\circ \text{ гр.}, a = 1$

03.53.201.18 – ЭМ									
Расчет обмотки статора трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором при ремонте									
Изм.	Кол-во	Лист	Из дат.	Листов	Дата				
Разработ.	Собольков								
Рисовал.	Савицкая								
Контроль.	Савицкая								
Н. контрол.	Зброва								
Зав. каф.	Зброва								
		Лист	Лист	Листов					
		С	1	2					
		Трехфазный асинхронный двигатель			БГАТУ 1234567				
		Развернутая схема обмотки статорной обмотки							



ДЛЯ ЗАМЕТОК

РЕПОЗИТОРИЙ БГАТУ

*Учебное издание*

**РЕМОНТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.  
КУРСОВОЕ ПРОЕКТИРОВАНИЕ**

*Учебно-методическое пособие*

Составитель  
**Селицкая** Оксана Юрьевна

Ответственный за выпуск *В. М. Збродыга*  
Редактор *В. А. Гошко*  
Корректор *В. А. Гошко*  
Компьютерная верстка *В. А. Гошко, О. Ю. Селицкой*  
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 03.03.2018. Формат 60×84<sup>1</sup>/<sub>8</sub>.  
Бумага офсетная. Ризография.  
Усл. печ. л. 17,20. Уч.-изд. л. 6,72. Тираж 98 экз. Заказ 28.

Издатель и полиграфическое исполнение:  
Учреждение образования  
«Белорусский государственный аграрный технический университет».  
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,  
распространителя печатных изданий  
№ 1/359 от 09.06.2014.  
№ 2/151 от 11.06.2014.  
Пр-т Независимости, 99-2, 220023, Минск.