

минобрнауки РФ  
федеральное государственное образовательное учреждение  
высшего образования  
"ПРИАМУРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ ШОЛОМ-АЛЕЙХЕМА

кафедра технических дисциплин

Методические указания для выполнения курсового проекта  
по дисциплине "Электрические машины"

Биробиджан 2017

## ВВЕДЕНИЕ

Цель учебной дисциплины «Электрические машины» состоит в подготовке специалиста высшей квалификации способного выполнять задачи, связанные с использованием электрических машин в промышленности.

В результате изучения этой дисциплины студент должен знать устройство, принципы действия, характеристики, режимы работы и области применения электрических машин, уметь подключать и испытывать, рассчитывать измерять параметры, строить необходимые характеристики электрических машин, выбирать пусковую и регулировочную аппаратуру. Специалист должен быть подготовлен к решению задач, связанных с выбором, монтажом и рациональной эксплуатацией электрических машин в промышленности.

Электрические машины широко применяются во всех отраслях народного хозяйства, в том числе в промышленном производстве и быту населения в качестве основных элементов энергетических установок, технологического оборудования различных машин и механизмов. Производство, передача, распределение и потребление электрической энергии связаны с широким использованием электрических машин.

Знания по дисциплине электрические машины формируются у студента на лекционных, практических и лабораторных занятиях, во время самостоятельной работы над индивидуальными заданиями и курсовой работой. В процессе курсового проектирования студент совершенствует навыки применения теоретических знаний для решения задач возникающих в практике инженера-электрика занимающегося проектированием монтажом и эксплуатацией энергетического оборудования.

# 1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ КУРСОВОГО ПРОЕКТИРОВАНИЯ

## 1.1. Цель и задачи курсового проектирования по электрическим машинам

Учебная дисциплина «Электрические машины» базируется на дисциплинах «Физика», «Высшая математика», «Электротехника и электроника», в свою очередь, она является базовой для курсов «Электрический привод», «Электроснабжение», «Автоматика», «Эксплуатация электрооборудования».

Дисциплина изучается в 5 и 6 семестрах в форме лекций лабораторно-практических занятия и курсового проектирования.

Цель курсового проектирования заключается в развитии навыков самостоятельной работы по оценке производственной ситуации и принятии инженерного решения, а также в отработке методических приемов применения теоретических знаний при решении инженерных задач.

Курсовая работа выполняется в объеме, утвержденном кафедрой. Каждый студент закрепляется за руководителем курсовой работы, который консультирует студента по всем разделам. Ход работы систематически контролируется кафедрой. Для защиты курсовых работ на кафедре создают комиссию в составе не менее 2-х преподавателей. Комиссия работает по утвержденному графику.

## 1.2. Цель работы

Вы работаете в должности главного энергетика сельскохозяйственного предприятия. В составе предприятия имеются ответственные потребители 1-й категории, не допускающие длительных перерывов в электроснабжении. Бесперебойность электроснабжения на таких объектах обеспечивается с помощью резервных дизельных электростанций.

В результате аварии произошедшей на резервной дизельной электростанции вышла из строя трехфазная обмотка статора синхронного генератора. В ходе обследования установлено, что по имеющимся остаткам схему обмотки можно определить только предположительно (ориентировочно). Число витков фазы обмотки установить невозможно.

В то же время состояние ротора удовлетворительное, обмотка возбуждения ротора, тело ротора и полюсные наконечники сохранились хорошо. По паспортным данным известны параметры магнитной индукции создаваемой ротором в воздушном зазоре 1, 3, 5 и 7 пространственными гармониками.

Известно, что данная электростанция обеспечивает аварийное питание автоматизированной инкубаторной станции. Надежная работа средств автоматического управления которой возможна только при обеспечении высокого качества напряжения. В соответствии с ГОСТ 183-66 коэффициент формы напряжения  $K_\phi$  не должен превышать 5 %.

Синхронный генератор дизельной электростанции работает в генераторном режиме и является источником электроэнергии только в периоды ава-

рии основного источника электроэнергии – государственной линии электропередачи. Когда же электроснабжение объектов работает в нормальном режиме, то синхронный генератор переводится в режим синхронного двигателя для привода компрессорной установки подающей сжатый воздух в цех переработки продукции. Следовательно, при изменении обмотки необходимо проанализировать характер намагничивающих сил и вращающегося магнитного поля создаваемого обмоткой статора, для того чтобы доказать возможность работы данной машины в режиме двигателя.

На основании изложенного можно сформулировать цели и задачи курсовой работы.

Цель: освоить навыки расчета и оптимизации геометрических и электрических параметров трехфазных обмоток.

Задачи: По имеющимся геометрическим размерам статора синхронного генератора и заданному напряжению рассчитать число витков в фазе обмотки.

Выполнить оценку гармонического состава ЭДС генератора. При необходимости провести оптимизацию гармонического состава ЭДС и рассчитать окончательный вариант обмотки, удовлетворяющий требованиям стандарта.

#### **Задание:**

Выполнить предварительный расчет:  
параметров обмотки статора  
результатирующей ЭДС витка с учетом высших гармонических составляющих.

намагничивающей силы трехфазной обмотки.

Произвести оценку гармонического состава индуктируемой ЭДС (по коэффициенту формы) и при необходимости провести оптимизацию гармонического состава (коэффициента формы) в соответствии с ГОСТ 183-66.

Произвести расчет и конструирование окончательного варианта обмотки.

## **Содержание работы.**

### **1. Введение.**

### **2. Предварительный расчет параметров обмотки.**

- 2.1. Полусное деление  $\tau$ .
- 2.2. Число пазов на полюс и фазу  $q$ .
- 2.3. Шаг обмотки  $y$ .
- 2.4. Угол сдвига ЭДС в соседних пазах  $\alpha$ .
- 2.5. Конструирование схемы обмотки.

### **3. Расчет результирующей ЭДС витка с учетом высших гармонических составляющих.**

- 3.1. Методика расчета ЭДС витка.
- 3.2. Расчет 1, 3, 5 и 7 гармонических составляющих и результирующей ЭДС витка.

### **4. Оценка качества и улучшение гармонического состава ЭДС вариантным методом.**

- 4.1. Методика оценки качества ЭДС.
- 4.2. Улучшение гармонического состава ЭДС.

### **5. Расчет и конструирование окончательного варианта обмотки статора.**

- 5.1. Составление схемы-таблицы, схемы-развертки и звезды пазовых ЭДС окончательного варианта обмотки.
- 5.2. Расчет числа витков секции, катушечной группы, фазы и ЭДС обмотки.

### **6. Литература.**

## **2. МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

### **2.1. Предварительный расчет параметров обмотки**

#### **2.1.1. Полусное деление $\tau$**

**Полусным делением называется часть окружности статора приходящая на один полюс.** Полусное деление измеряется и рассчитывается как в пазах статора  $Z$ , так и в линейных единицах (м). Для составления схемы обмотки полусное деление рассчитывается в пазах статора и представляет собой число пазов статора приходящихся на один полюс:

$$\tau = Z / 2p .$$

Для расчета магнитного потока полусное деление рассчитывается в единицах длины (м)

$$\tau = \pi D / 2p .$$

### 2.1.2. Число пазов на полюс и фазу $q$

$$q = \frac{Z}{2pt},$$

где  $m$  – число фаз обмотки,  $m = 3$

### 2.1.3. Шаг обмотки $y$

**Шагом обмотки называется расстояние между первой и второй активными сторонами одной секции, выраженное в пазах статора.**

Для двухслойных обмоток шаг рассчитывается по формуле:

$$y = \beta\tau,$$

где  $\beta$  – коэффициент укорочения шага, который выбирается конструктором обмотки.

Шаги однослойных обмоток рассчитываются следующим образом.

Для однослойных шаблонных обмоток рекомендуется  $y = \tau$ .

Однослойные концентрические обмотки имеют несколько частичных шагов. Количество шагов равно числу пазов на полюс и фазу  $q$ . Частичные шаги  $y_j$ , рассчитываются по формуле:

$$y_j = 2(q + (q - j)) + 1,$$

где  $q$  – число пазов на полюс и фазу;  $j$  – номер секции.

### 2.1.4. Угол сдвига ЭДС между соседними пазами статора в эл. градусах $\alpha$

$$\alpha = \frac{360 p}{Z}.$$

По рассчитанным в пунктах 2.1.1–2.1.4 параметрам составляется схема-таблица и вычерчивается схема-развертка трехфазной обмотки. При построении необходимо руководствоваться правилами конструирования обмоток.

### 2.1.5. Конструирование схемы обмотки.

#### 1. Правила конструирования схем двухслойных обмоток

1. Число катушечных групп в каждой фазе  $n$  равно числу полюсов  $2p$

$$n = 2p.$$

2. Начала катушечных групп одной фазы смещены относительно друг друга на 180 эл. град. (что соответствует смещению на 1 полюсное деление  $\tau$ ).

3. Число секций в каждой катушечной группе  $S$  равно числу пазов на полюс и фазу  $q$ :

$$S = q.$$

4. Катушечные группы одной фазы соединяются по схеме: конец предыдущей катушечной группы соединяется с концом последующей; начало предыдущей катушечной группы с началом последующей.

5. Начала обмоток различных фаз смещены относительно друг друга на 120 эл. град.

## *2. Правила конструирования схем однослойных обмоток*

1. Число катушечных групп в каждой фазе  $n$  равно числу пар полюсов  $p$

$$n = p.$$

2. Начала катушечных групп одной фазы смещены относительно друг друга на 360 эл. град. (что соответствует смещению на  $2\tau$ ).

3. Число секций в каждой катушечной группе  $S$  равно числу пазов на полюс и фазу  $q$ :

$$S = q.$$

4. Катушечные группы одной фазы соединяются по схеме: конец предыдущей катушечной группы соединяется с началом последующей.

5. Начала обмоток различных фаз смещены относительно друг друга на 120 эл. град.

## **2.2. Расчет результирующей ЭДС витка с учетом высших гармонических составляющих**

### **2.2.1. Методика расчета ЭДС витка**

Расчет выполняется для условной обмотки с числом витков в фазе  $W = 1$ . В реальных условиях такую обмотку выполнить невозможно, потому что фаза обмотки состоит из нескольких секций, например фаза однослойной обмотки состоит из  $qp$  секций, а фаза двухслойной обмотки из  $2qp$  секций. В свою очередь каждая секция состоит как минимум из одного витка, и поэтому минимальное количество витков в фазе однослойной обмотки не может быть меньше  $W_1 = qp$ , а двухслойной  $W_2 = 2qp$ . Однако с методической точки зрения расчет ЭДС с учетом высших гармонических составляющих наиболее просто выполнить для условной обмотки с  $W = 1$ .

Расчет выполняем по следующей формуле:

$$E = \sqrt{(E_1)^2 + (E_3)^2 + (E_5)^2 + \dots + (E_\nu)^2},$$

где  $E_\nu$  – действующее значение фазной ЭДС для  $\nu$ -гармоники.

Из бесконечного спектра гармонических составляющих в данной работе следует учитывать только  $\nu = 1, 3, 5$  и  $7$ .

Расчет  $E_\nu$  для любой гармоники проводится по следующей формуле:

$$E_\nu = 4,44 W K_{ov} f_\nu \Phi_\nu.$$

Составляющие последней формулы рассчитываются следующим образом:

$W = 1$  виток

$K_{ov}$  – обмоточный коэффициент по  $\nu$ -гармонической составляющей,

$$K_{ov} = K_{yv} K_{pv}.$$

$K_{yv}$  – коэффициент укорочения по  $\nu$ -гармонической составляющей,

$$K_{yv} = \sin \frac{\nu y \pi}{2\tau}.$$

Следует учитывать, что для однослойных обмоток  $\beta = y/\tau = 1$  и  $K_{yv} = 1,0$ .

$K_{pv}$  – коэффициент распределения по  $\nu$ -гармонической составляющей,

$$K_{pv} = \frac{\sin(\nu q \alpha / 2)}{q \sin(\nu \alpha / 2)}.$$

$f_\nu$  – частота  $\nu$ -гармонической составляющей.

Частоту любой гармоники вычисляют по формуле:

$$f_\nu = \nu f_1$$

где  $f_1$  – частота первой гармоники, принимается равной частоте сети  $f_1 = 50$  Гц.

$\Phi_\nu$  – магнитный поток  $\nu$ -гармонической составляющей

$$\Phi_\nu = \frac{2 B_{mv} L \tau}{\pi \nu}.$$

При расчете  $\Phi_\nu$  полюсное деление  $\tau$  следует измерять в метрах. Все остальные величины даны в задании.



## 2.3. Оценка качества ЭДС и улучшение гармонического состава ЭДС вариантным методом

### 2.3.1. Методика оценки качества ЭДС

Качество индуктируемой ЭДС оценивается по коэффициенту формы:

$$K_{\phi} = \frac{\sqrt{(E_3)^2 + (E_5)^2 + (E_7)^2}}{E_1}.$$

Коэффициент формы показывает долю высших гармонических составляющих в кривой ЭДС по сравнению с 1-й гармонической составляющей.

В соответствии с ГОСТ 183-66 доля высших гармонических составляющих не должна превышать 5 %.

### 2.3.2. Улучшение гармонического состава ЭДС

Если в расчете получено, что  $K_{\phi} > 5\%$ , то результаты расчета считаются неудовлетворительными. Чтобы уменьшить величину  $K_{\phi}$  необходимо внести изменения в исходные данные и выполнить весь расчет заново.

Следует учитывать, что на величину  $K_{\phi}$  наибольшее влияние оказывают такие параметры: тип обмотки; коэффициент укорочения шага обмотки, гармонический состав магнитного потока создаваемого ротором. Как правило, однократным изменением какого-либо параметра не удастся достичь желаемого значения  $K_{\phi}$ , часто приходится прибегать к изменению всех 3-х величин. Учитывая большую трудоемкость пересчета каждого варианта рекомендуется выполнять расчеты с помощью ЭВМ. На кафедре разработана специальная программа выполняющая необходимый расчет и представляющая результаты в компактной табличной форме.

Работа по оптимизации  $K_{\phi}$  проводится по следующей методике. В ЭВМ вводятся исходные данные расчета по основному варианту. Делается распечатка результатов расчета (контрольный вариант). Затем в исходных данных изменяется выбранный параметр. Например, вместо однослойной обмотки принимается двухслойная. Полученный результат сравнивается с предыдущим. Если по-прежнему  $K_{\phi} > 5\%$ , то в исходных данных изменяется следующий параметр, например, коэффициент укорочения по шагу  $\beta$  уменьшается от 1,0 до 0,8 полученный результат распечатывается и анализируется. Допустим, что  $K_{\phi}$  уменьшился, но все еще больше 5 %. Тогда следующим шагом принимаем  $\beta = 0,6$ . Предположим, что  $K_{\phi}$  в этом случае увеличивается. Это означает, что оптимальное значение  $K_{\phi}$  уже пройдено и, чтобы его отыскать, нужно изменять  $\beta$  с меньшими интервалами.

Если путем изменения коэффициента укорочения шага не удастся обеспечить желаемую величину  $K_{\phi}$ , тогда следует изменять гармонический состав магнитного потока, ротора. Однако нужно учитывать, что этим приемом

можно пользоваться в последнюю очередь, так как в реальной машине изменение магнитного поля связано с изменением конфигурации полюсных наконечников, а это достаточно сложно сделать с высокой точностью.

Перебор вариантов следует закончить когда будет получено минимальное значение  $K_\phi$ . В пояснительную записку подшиваются 5–6 распечаток расчетов. На каждой распечатке делаются пояснения физической сущности и взаимосвязи явлений, вследствие которых изменение исходного параметра приводит к изменению коэффициента формы ЭДС.

Вариант расчета с минимальным значением  $K_\phi < 5 \%$  следует признать основным. Этот вариант определяет тип и параметры обмотки и будет использоваться для дальнейших расчетов.

## **2.4. Расчет и конструирование окончательного варианта обмотки статора**

### **2.4.1. Составление схемы-таблицы, схемы-развертки и звезды пазовых ЭДС окончательного варианта обмотки**

Для принятого окончательного варианта обмотки составляется схема-таблица и схема-развертка обмотки, а также строится звезда пазовых ЭДС и звезда фазных ЭДС обмоток. Расчет параметров обмотки принимается по данным распечатки, а при составлении схем следует пользоваться методическими рекомендациями п. 2.1.1–2.1.5.

### **2.4.2. Расчет числа витков секции катушечной группы и фазы обмотки**

Расчет числа витков фазы обмотки генератора проводится по формуле:

$$W_{II} = \frac{U_\phi}{E}.$$

Данное число витков  $W_{II}$  является предварительным, чтобы получить окончательное значение числа витков фазы нужно рассчитать число эффективных витков секции  $W_\Delta$ . Оно зависит от конструкции обмотки. Для однослойных обмоток  $W_\Delta$  находится по формуле:

$$W_\Delta = \frac{W_{II}}{pq},$$

для двухслойных обмоток –

$$W_\Delta = \frac{W_{II}}{2pq}.$$

Как правило, при расчете  $W_{\Delta}$  получается дробным, а оно может быть только целым. Полученное значение округляется до ближайшего большего целого значения. Это будет число витков секции  $W_C$ . По принятому значению  $W_C$  рассчитывается число витков катушечной группы по формуле:

$$W_K = qW_C.$$

Затем рассчитывается окончательное число витков фазы, для однослойной обмотки:

$$W_{\phi} = pqW_C,$$

для двухслойной обмотки –

$$W_{\phi} = 2pqW_C.$$

После того как рассчитано окончательное число витков  $W_{\phi}$  необходимо уточнить величину ЭДС индуктируемой обмотки. Она рассчитывается по формуле:

$$E_{\phi} = E W_{\phi}, \quad E_{\phi} \geq U_{\phi}.$$

### Список литературы

а) основная литература (библиотека СГАУ)

1. **Ванурин, В.Н.** Электрические машины. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2016. — 304 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/72974>.

2. **Епифанов, А.П.** Электрические машины. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2006. — 272 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/591>

3. **Ванурин, В.Н.** Статорные обмотки асинхронных электрических машин. [Электронный ресурс] — Электрон. дан. — СПб. : Лань, 2014. — 176 с. — Режим доступа: <http://e.lanbook.com/book/51939>

б) дополнительная литература

1. **Кацман, М.М.** Электрические машины [Текст]: учебник для студентов образовательных учреждений среднего проф. образования / М.М. Кацман. - 9-е изд. стереотип. - М : Академия, 2008. - 496 с. - ISBN 978-5-7695-5773-6 : 645.042.

1. **Набиев, Ф. М.** Электрические машины [Текст]: учеб. пособие для вузов/ Под ред. Проф. И.И. Алиева. – М.: ИП РадиоСофт, 2008. –292с.: ил. – 500экз. – ISBN:5-93037.

3. **Вольдек, А.И.** Электрические машины. Машины переменного тока [Текст]: учебник для вузов/В.В.Попов. – СПб.:Питер. – 2008. – 350с. –3000

экз.: ил.. – ISBN 978-5-469-01380-9.

**4.Вольдек, А.И.** Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы [Текст]: учебник для вузов/В.В.Попов. – СПб.:Питер. – 2008. – 320с. –3000 экз.: ил.. – ISBN 978-5-469-01380-8

в) ресурсы информационно-телекоммуникационной сети «Интернет»

**1. Встовский, А.Л.** Электрические машины [Текст]: учеб. Пособие.- Красноярск :Сиб.федер.ун-т, 2013. – 464с. - ISBN: 978-5-7638-2518-3. <http://ibooks.ru/reading.php?productid=342918>.

**2. Девочкин, О.В.** Электрические аппараты [Текст]: учебное пособие для вузов/ В.В. Лохнин, Р.В. Меркулов. - 3-е изд., стереотип. - М. : Издательский центр "Академия", 2012. - 240 с. - ISBN 978-5-7695-8865-5.

### **3. ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ**

Курсовая работа выполняется в соответствии с содержанием приведенном в п. 1.2.

Во введении обосновывается актуальность темы, указывается цель и задание по работе. Приводятся исходные данные.

#### **Исходные данные (пример)**

Вариант №

Фазное напряжение  $U_{\phi} = 380$  В.

Число пар полюсов  $p = 2$ .

Тип обмотки, двухслойная –  $A_1 = 2$

Число пазов  $Z = 36$

Диаметр статора  $D = 266$  мм.

Длина пакета статора  $L = 213$  мм.

Коэффициент укорочения  $\beta = 0,7$

Составляющие индукции создаваемой ротором:

Индукция 1-й гармоники  $B_1 = 0,88$  Тл.

Индукция 3-й гармоники  $B_3 = 0,55$  Тл.

Индукция 5-й гармоники  $B_5 = 0,13$  Тл.

Индукция 7-й гармоники  $B_7 = 0,014$  Тл.

### **3.1. Предварительный расчет параметров обмотки**

#### **3.1.1. Полюсное деление $\tau$**

**Полюсным делением называется число пазов статора, приходящихся на один полюс:**

$$\tau = \frac{Z}{2p} = \frac{36}{2 \cdot 2} = 9 \text{ пазов.}$$

### 3.1.2. Число пазов на полюс и фазу $q$

$$q = \frac{Z}{2pm} = \frac{36}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 3.$$

### 3.1.3. Шаг обмотки $y$

Шагом обмотки называется расстояние между первой и второй активными сторонами секции выраженное в пазах.

Для двухслойных обмоток шаг рассчитывается по формуле:

$$y = \beta \cdot \tau = 0,7 \cdot 9 \approx 6.$$

### 3.1.4. Угол сдвига ЭДС в соседних пазах статора $\alpha$

$$\alpha = \frac{360p}{Z} = \frac{360 \cdot 2}{36} = 20^\circ.$$

### 3.1.5. Конструирование схемы обмотки

По рассчитанным параметрам в соответствии с правилами конструирования схем двухслойных обмоток, составляем схему-таблицу и по ней строим схему-развертку обмотки.

Схема-таблица двухслойной обмотки по данным  $Z = 36$ ;  $2p = 4$ :

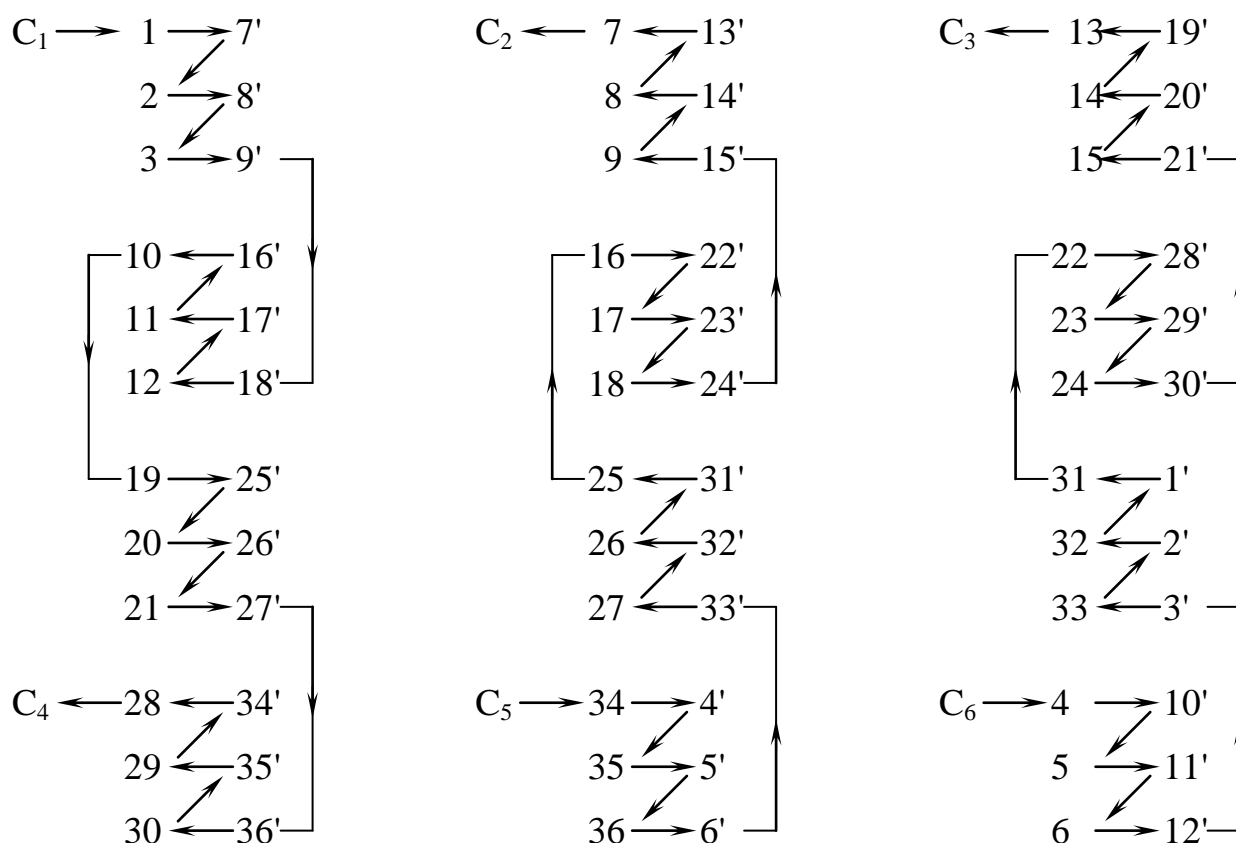


Рис. 1. Схема таблица предварительного варианта обмотки статора  $Z = 36$ ;  $2p = 4$ ;  $\tau = 9$ ;  $y = 6$ ; тип обмотки – двухслойная.

## 3.2. Расчет результирующей ЭДС витка с учетом высших гармонических составляющих

### 3.2.1. Методика расчета ЭДС витка

Расчет выполняем по следующей формуле:

$$E = \sqrt{(E_1)^2 + (E_3)^2 + (E_5)^2 + \dots + (E_v)^2},$$

где  $E_v$  – действующее значение фазной ЭДС для  $v$ -гармоники.

Из бесконечного спектра гармонических составляющих в данной работе следует учитывать только значения  $v = 1, 3, 5$  и  $7$ .

Расчет  $E_v$  для любой гармоники проводится по следующей формуле:

$$E_v = 4,44 WK_{ov} f_v \Phi_v.$$

Составляющие последней формулы рассчитываются следующим образом:

$$W = 1 \text{ виток.}$$

$K_{ov}$  – обмоточный коэффициент по  $v$ -гармонической составляющей,

$$K_{ov} = K_{yv} K_{pv}.$$

$K_{yv}$  – коэффициент укорочения по  $v$ -гармонической составляющей, рассчитывается по формуле:

$$K_{yv} = \sin \frac{vy\pi}{2\tau}.$$

$K_{pv}$  – коэффициент распределения по  $v$ -гармонической составляющей, рассчитывается по формуле:

$$K_{pv} = \frac{\sin(vq\alpha/2)}{q \sin(v\alpha/2)}.$$

Частота любой гармоники рассчитывается по формуле:

$$f_v = vf$$

где  $f$  – частота сети,  $f = 50$  Гц.

$\Phi_v$  – магнитный поток  $v$ -гармонической составляющей

$$\Phi_v = \frac{2B_{mv}L\tau}{\pi v}.$$

При расчете  $\Phi_v$  полюсное деление  $\tau$  следует измерять в линейных единицах, м:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p}.$$

### 3.2.2. Расчет 1, 3, 5 и 7 гармонических составляющих и результирующей ЭДС витка.

ЭДС 1-й гармонической составляющей. Учитываем, что по условию  $W = 1$  и рассчитываем коэффициент укорочения 1-й гармонической составляющей:

$$K_{y1} = \sin \frac{1 \cdot 6 \cdot 3,14}{2 \cdot 9} = 0,86603 \quad ,$$

Рассчитаем коэффициент распределения 1-й гармонической составляющей:

$$K_{p1} = \frac{\sin(1 \cdot 3 \cdot 20 / 2)}{3 \cdot \sin(1 \cdot 20 / 2)} = 0,95984 \quad ,$$

обмоточный коэффициент  $K_{o1} = 0,86603 \cdot 0,95984 = 0,83124$ , частота ЭДС  $f_1 = 1 \cdot 50 = 50$  Гц

Магнитный поток 1-й гармонической составляющей:

$$\Phi_1 = \frac{2 \cdot 0,88 \cdot 0,213 \cdot 0,20881}{3,14 \cdot 1} = 0,02493 \quad \text{Вб.}$$

Полусное деление, выраженное в линейных единицах, м:

$$\tau = \frac{3,14 \cdot 0,266}{2 \cdot 2} = 0,20881 \quad .$$

Действующее значение ЭДС

$$E_1 = 4,44 \cdot 1 \cdot 0,83124 \cdot 50 \cdot 0,02493 = 4,60039 \quad \text{В.}$$

ЭДС 3-й гармонической составляющей. Коэффициент укорочения:

$$K_{y3} = \sin \frac{3 \cdot 6 \cdot 3,14}{2 \cdot 9} = 1,2 \cdot 10^{-16} \quad .$$

Коэффициент распределения

$$K_{p3} = \frac{\sin(3 \cdot 3 \cdot 20 / 2)}{3 \cdot \sin(3 \cdot 20 / 2)} = 0,66697 \quad .$$

Обмоточный коэффициент

$$K_{o3} = 1,2 \cdot 10^{-16} \cdot 0,66697 = 8,2 \cdot 10^{-17} \quad .$$

Частота ЭДС

$$f_3 = 3 \cdot 50 = 150 \quad \text{Гц.}$$

Магнитный поток

$$\Phi_3 = \frac{2 \cdot 0,55 \cdot 0,213 \cdot 0,20881}{3,14 \cdot 3} = 0,00519 \quad \text{Вб.}$$

Действующее значение ЭДС



$$E_3 = 4,44 \cdot 1 \cdot 8,2 \cdot 10^{-17} \cdot 150 \cdot 0,00519 = 2,8 \cdot 10^{-16} \text{ В.}$$

Расчет ЭДС 5-й гармонической составляющей. Рассчитаем коэффициент укорочения

$$K_{y5} = \sin \frac{5 \cdot 6 \cdot 3,14}{2 \cdot 9} = -0,866 \text{ .}$$

Коэффициент распределения

$$K_{p5} = \frac{\sin(5 \cdot 3 \cdot 20 / 2)}{3 \cdot \sin(5 \cdot 20 / 2)} = 0,21815 \text{ .}$$

Обмоточный коэффициент

$$K_{o5} = -0,866 \cdot 0,21815 = -0,1889 \text{ .}$$

Частота ЭДС

$$f_5 = 5 \cdot 50 = 250 \text{ Гц.}$$

Магнитный поток

$$\Phi_5 = \frac{2 \cdot 0,13 \cdot 0,213 \cdot 0,20881}{3,14 \cdot 5} = 0,00074 \text{ Вб.}$$

действующее значение ЭДС

$$E_5 = 4,44 \cdot 1 \cdot (-0,1889) \cdot 250 \cdot 0,00074 = -0,1545 \text{ В.}$$

Расчет ЭДС 7-й гармонической составляющей. Коэффициент укорочения

$$K_{y7} = \sin \frac{7 \cdot 6 \cdot 3,14}{2 \cdot 9} = 0,86603 \text{ .}$$

Коэффициент распределения

$$K_{p7} = \frac{\sin(7 \cdot 3 \cdot 20 / 2)}{3 \cdot \sin(7 \cdot 20 / 2)} = -0,17683 \text{ .}$$

Обмоточный коэффициент

$$K_{o7} = 0,86603 \cdot (-0,17683) = -0,15314 \text{ .}$$

Частота ЭДС

$$f_7 = 7 \cdot 50 = 350 \text{ Гц.}$$

Магнитный поток

$$\Phi_7 = \frac{2 \cdot 0,014 \cdot 0,213 \cdot 0,20881}{3,14 \cdot 7} = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ Вб.}$$

Действующее значение ЭДС

$$E_7 = 4,44 \cdot 1 \cdot (-0,15314) \cdot 350 \cdot 5,7 \cdot 10^{-5} = -0,01348 \text{ В.}$$

Действующее значение фазной ЭДС 1-го витка обмотки с учетом высших гармонических составляющих

$$E = \sqrt{4,60039^2 + (2,8 \cdot 10^{-16})^2 + (-0,1545)^2 + (-0,01348)^2} = 4,603 \text{ В.}$$

### 3.3. Улучшение качества индуктируемой ЭДС

#### 3.3.1. Методика оценки качества ЭДС.

Качество индуктируемой ЭДС оценивается по коэффициенту формы, который показывает долю высших гармонических составляющих по отношению к первой гармонической. Расчетная формула следующая:

$$K_\phi = \frac{\sqrt{(E_3)^2 + (E_5)^2 + (E_7)^2}}{E_1}.$$

В соответствии с ГОСТ 183–66 доля высших гармоник не должна превышать 5 %, т.е.  $K_\phi < 5 \%$ .

Рассчитаем коэффициент формы

$$K_\phi = \sqrt{\frac{(2,8 \cdot 10^{-16})^2 + (-0,1545)^2 + (-0,01348)^2}{4,60039}} = 3,37027$$

Так как  $K_\phi = 3,37 < 5 \%$ , то нет необходимости вносить изменения в исходные данные, считая, что они определены верно.

#### 3.3.2. Улучшение гармонического состава ЭДС

Работу по улучшению гармонического состава ЭДС проводим с по-

мощью ЭВМ. Первоначально выполним контрольный расчет основного варианта задания.

Результаты этого расчета являются проверочными для всех предыдущих расчетов. Распечатка № 1 свидетельствует о том, что все предыдущие расчеты выполнены правильно (см. приложение).

Проверим полученное значение  $K_\phi = 3,37 \%$  минимальное ли оно или нет. Для этого делаем пробный расчет для значения  $\beta = 0,6$ , в результате  $K_\phi = 28,64 \%$  (Распечатка № 2). Увеличение  $K_\phi$  говорит о том, что изменением конструкции обмотки (т.е. увеличением укорочения шага обмотки) не удастся получить меньшее значение  $K_\phi$ , и следует использовать другой метод изменения гармонического состава. Изменяем гармонический состав магнитного потока ротора. Увеличим значение 1-й гармонической составляющей магнитной индукции со значения 0,88 Тл до 0,95 Тл, уменьшим значения 3-й, 5-й и 7-й гармонических составляющих магнитной индукции со значений 0,55 Тл до 0,5 Тл, с 0,13 Тл до 0,12 Тл, и с 0,014 Тл до 0,013 Тл соответственно и выполним расчет заново при  $\beta = 0,7$  (Распечатка № 3). В результате расчетов получен  $K_\phi = 2,88 \%$ , что также отвечает требованиям ГОСТ.

Принимаем окончательный вариант: тип обмотки – двухслойная, с укороченным шагом, коэффициент укорочения  $\beta = 0,7$ .

### **3.3. Расчет и конструирование окончательного варианта обмотки**

#### **3.3.1. Составление схемы-таблицы и схемы развертки окончательного варианта обмотки.**

В соответствии с результатами расчета, параметры окончательного варианта обмотки следующие:

Полюсное деление  $\tau = 9$ .

Шаг обмотки  $y = 6$ .

Коэффициент укорочения  $\beta = 0,7$ .

Число пазов на полюс и фазу  $q = 3$ .

Угол сдвига ЭДС соседних пазов  $\alpha = 20$  эл. град.

В соответствии с правилами конструирования обмотки строим схему таблицу обмотки (рис. 2).

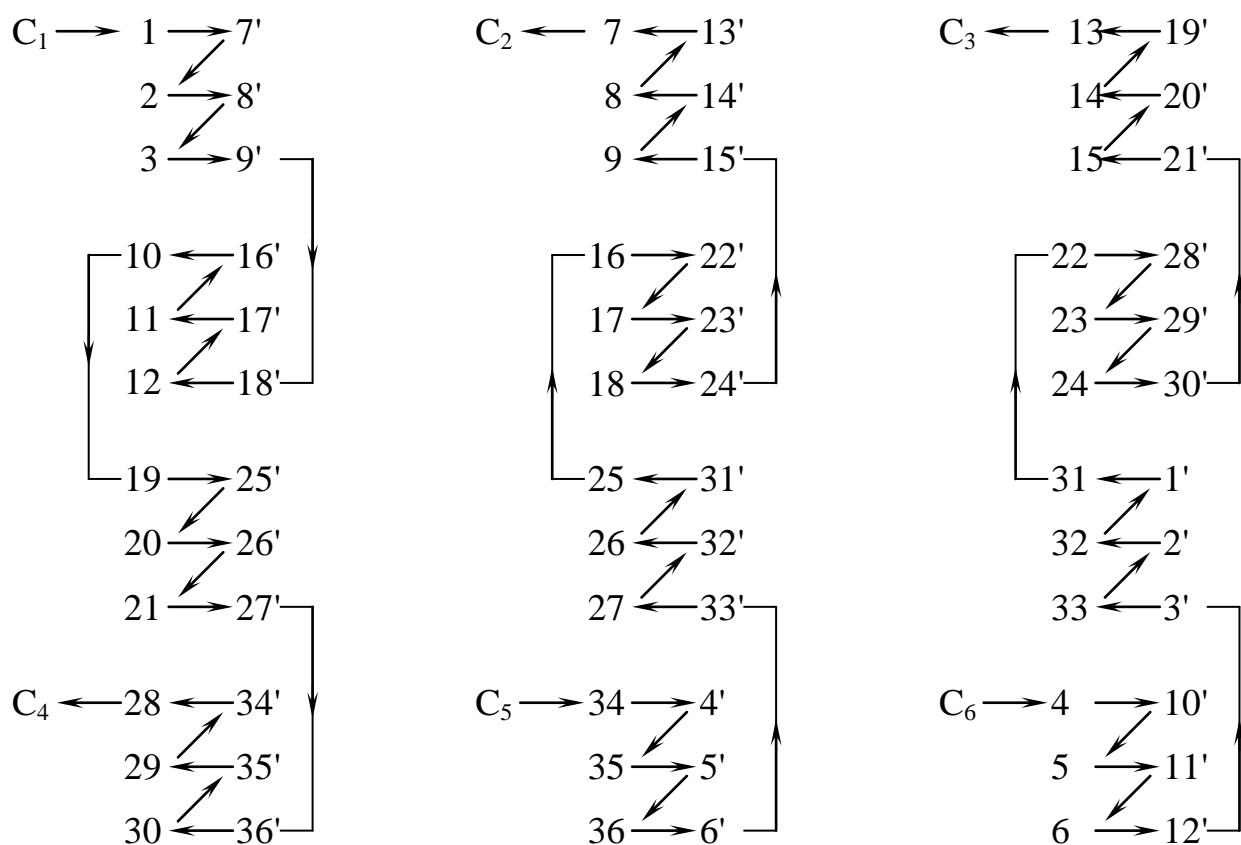
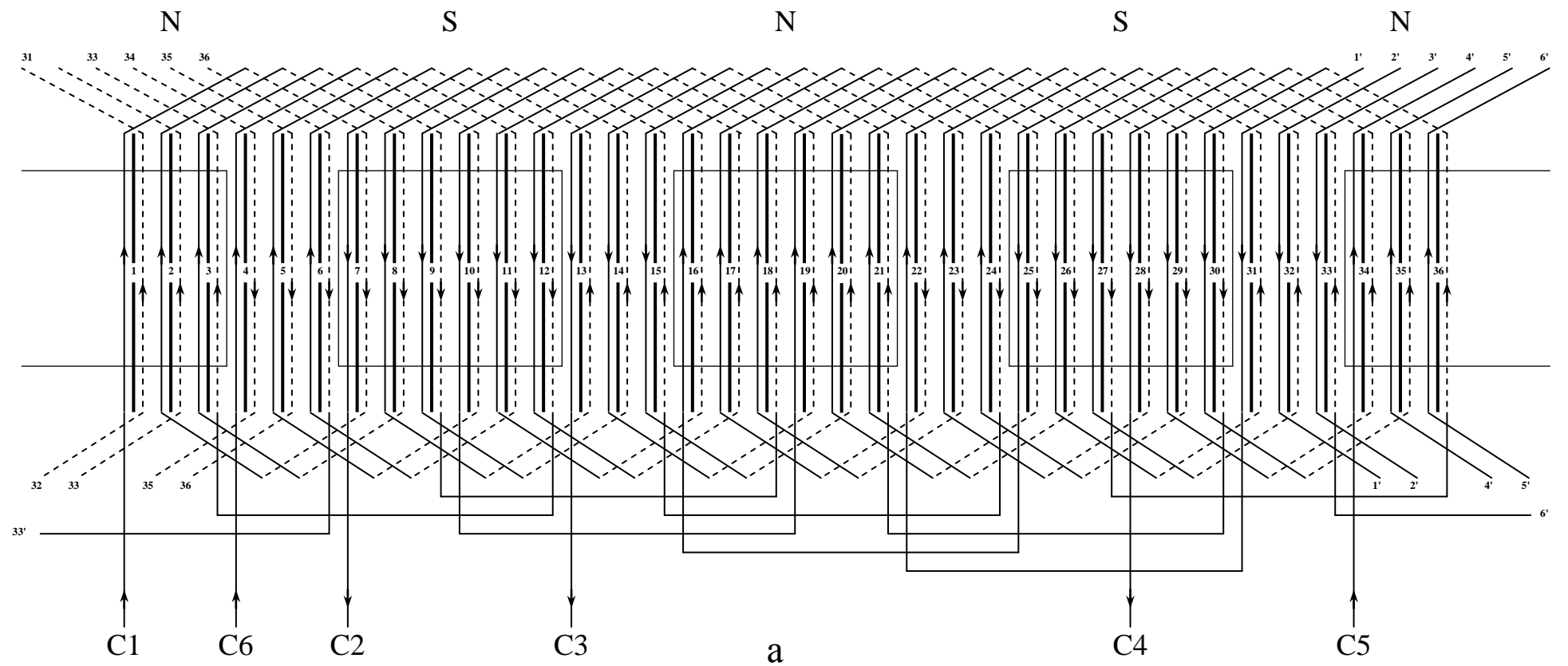


Рис. 2. Схема таблицы окончательного варианта обмотки статора:  $Z = 36$ ;  $2p = 4$ ;  $\tau = 9$ ;  $y = 6$ ;  $\beta = 0,7$ ;  $q = 3$ ;  $\alpha = 20$  эл. град. Тип обмотки – двухслойная.

По рассчитанной схеме-таблице строим схему-развертку и звезду пазовых и фазных ЭДС обмотки рис. 3.



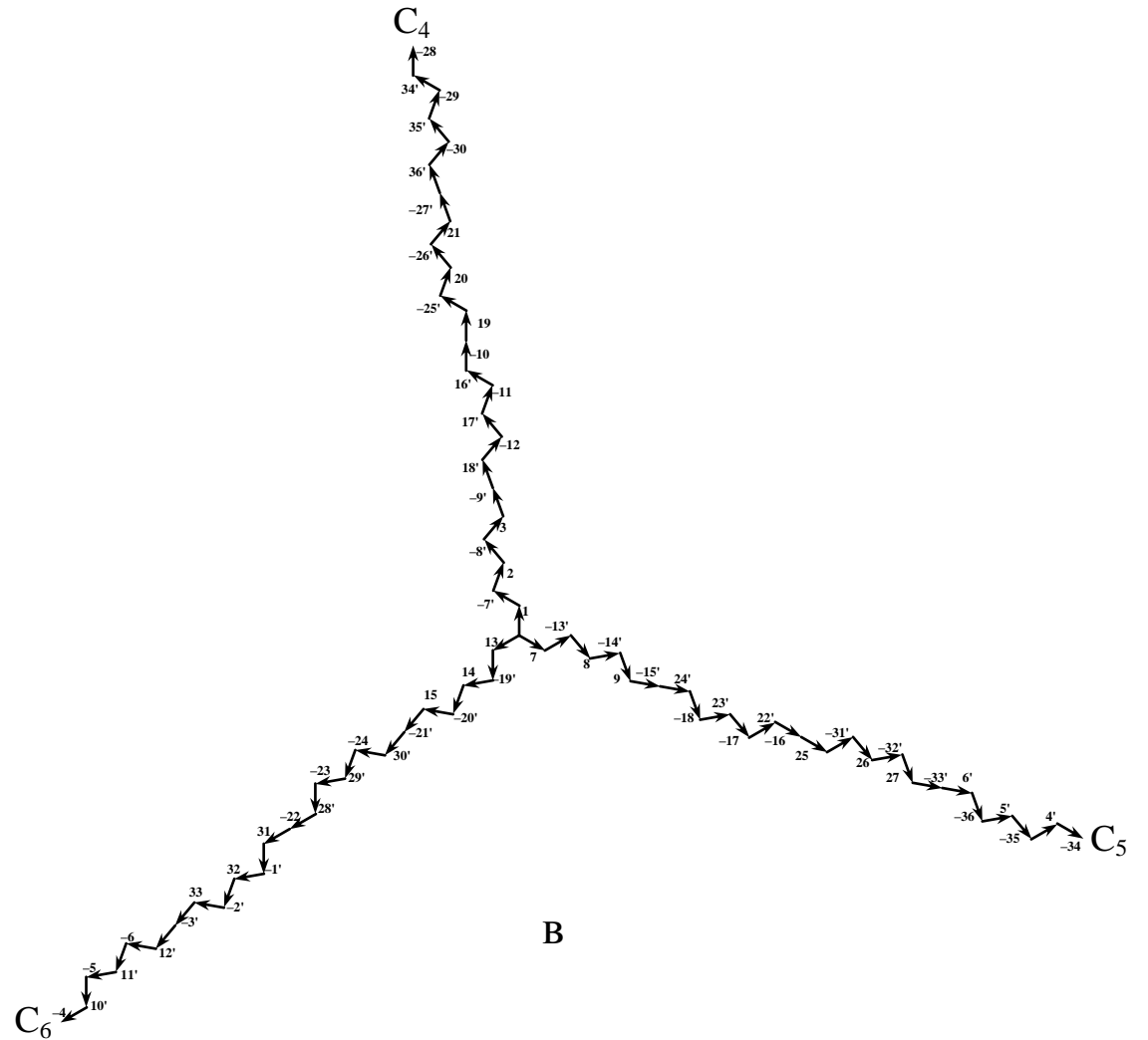
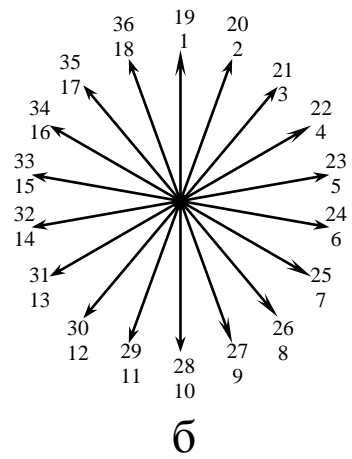


Рис. 3. Схема-развертка окончательного варианта: а – обмотка статора; б – звезда пазовых ЭДС; в – звезда фазных ЭДС обмотки.  
 Данные обмотки.  $Z = 36$ ;  $2p = 4$ ;  $\tau = 9$ ;  $y = 6$ ;  $\beta = 0,7$ ;  $\alpha = 20$  эл. град.

### 3.3.2. Расчет числа витков секции, катушечной группы, фазы и обмотки

Рассчитаем предварительное число витков фазы:

$$W_{\Pi} = \frac{U_{\phi}}{E} = \frac{380}{4,96839} = 76,4836 \text{ ВИТКОВ.}$$

Рассчитаем число эффективных витков секции  $W_{\mathcal{E}}$ , для двухслойных обмоток оно определяется по формуле:

$$W_{\mathcal{E}} = \frac{W_{\Pi}}{2pq} = \frac{76,4836}{2 \cdot 2 \cdot 3} = 6,37 \text{ ВИТКОВ.}$$

Округляем полученное значение до ближайшего большего и получаем  $W_C = 7$ .

Рассчитаем число витков катушечной группы:

$$W_K = qW_C = 3 \cdot 7 = 21 \text{ ВИТОК.}$$

Найдем окончательное число витков фазы:

$$W_{\phi} = 2pW_K = 2 \cdot 2 \cdot 21 = 84 \text{ ВИТКА.}$$

По окончательному числу витков фазы определим величину индуктируемой ЭДС:

$$E = EW_{\phi} = 4,96839 \cdot 84 = 417,345 \text{ В}$$

Так как  $E > U_{\phi}$ , то расчет можно считать законченным.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ВАРИАНТ

Напряжение, В  $U_{\phi} =$  380  
 Число пар полюсов  $p =$  2  
 тип обмотки  $A1 =$  2

РАСЧЕТ  
 ПАРАМЕТРОВ  
 ОБМОТКИ

ДВУХСЛ

Число пазов, шт  $Z =$  36

Диаметр статора, мм  $D =$  266

Длина пакета, мм  $L =$  213

Условное число витков  $W =$  1

Число парал. ветвей  $A$  1

К-т укорочения  $K_u =$  0,7

Индукция 1 гарм., Тл 0,88

Индукция 3 гарм., Тл 0,55

Индукция 5 гарм., Тл 0,13

Индукция 7 гарм., Тл 0,014

$P =$  2

$T =$  9

$q =$  3

$Y =$  6

$Y1 =$  0  $Y5 =$  0

$Y2 =$  0  $Y6 =$  0

$Y3 =$  0  $Y7 =$  0

$Y4 =$  0  $Y8 =$  0

$AL =$  20

РАСЧЕТ ЭДС

	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм
К-т укорочен $K_u =$	0,86603	1,2E-16	-0,866	0,86603
К-т распредел. $K_p =$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,1768
Обмоточный к-т $K_o =$	0,83124	8,2E-17	-0,1889	-0,1531
Полюс. деление, м $T_v =$	0,20881	0,0696	0,04176	0,02983
Магн. поток, Вб $\Phi =$	0,02493	0,00519	0,00074	5,7E-05
Частота, Гц $f =$	50	150	250	350
ЭДС гармоника, В $E_v =$	4,60039	2,8E-16	-0,1545	-0,0135
ЭДС витка, В $E =$	4,603		$W =$	82,5549

Коэффициент формы  $K_{\phi} =$  3,37027  $W_{yt} =$  84

Уточненная ЭДС фазы, В = 386,652



ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ВАРИАНТ

Напряжение, В  $U_{\phi} =$  380  
 Число пар полюсов  $p =$  2  
 тип обмотки  $A1 =$  2

РАСЧЕТ  
 ПАРАМЕТРОВ  
 ОБМОТКИ

ДВУХСЛ

Число пазов, шт  $Z =$  36  
 Диаметр статора, мм  $D =$  266  $P =$  2  
 Длина пакета, мм  $L =$  213  $T =$  9  
 Условное число витков  $W =$  1  $q =$  3  
 Число парал. ветвей  $A$  1  $Y =$  5  
 К-т укорочения  $K_u =$  0,6  $Y1 =$  0  $Y5 =$  0  
 Индукция 1 гарм., Тл 0,88  $Y2 =$  0  $Y6 =$  0  
 Индукция 3 гарм., Тл 0,55  $Y3 =$  0  $Y7 =$  0  
 Индукция 5 гарм., Тл 0,13  $Y4 =$  0  $Y8 =$  0  
 Индукция 7 гарм., Тл 0,014  $AL =$  20

РАСЧЕТ ЭДС

	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм
К-т укорочен $K_u =$	0,76604	0,5	-0,93969	-0,17365
К-т распредел. $K_p =$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,17683
Обмоточный к-т $K_o =$	0,73528	0,33349	-0,20499	0,03071
Полюс. деление, м $T_v =$	0,20881	0,0696	0,04176	0,02983
Магн. поток, Вб $\Phi =$	0,02493	0,00519	0,00074	5,7E-05
Частота, Гц $f =$	50	150	250	350
ЭДС гармоники, В $E_v =$	4,06928	1,15352	-0,1676	0,0027
ЭДС витка, В $E =$	4,23294		$W =$	89,7722

Коэффициент формы  $K_{\phi} =$  28,6447  $W_{ут} =$  96

Уточненная ЭДС фазы, В = 406,362

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

ВАРИАНТ

Напряжение, В  $U_{\phi} =$  380  
 Число пар полюсов  $p =$  2  
 тип обмотки  $A1 =$  2

РАСЧЕТ  
 ПАРАМЕТРОВ  
 ОБМОТКИ

ДВУХСЛ

Число пазов, шт  $Z =$  36  
 Диаметр статора, мм  $D =$  266  $P =$  2  
 Длина пакета, мм  $L =$  213  $T =$  9  
 Условное число витков  $W =$  1  $q =$  3  
 Число парал. ветвей  $A$  1  $Y =$  6  
 К-т укорочения  $K_u =$  0,7  $Y1 =$  0  $Y5 =$  0  
 Индукция 1 гарм., Тл 0,95  $Y2 =$  0  $Y6 =$  0  
 Индукция 3 гарм., Тл 0,5  $Y3 =$  0  $Y7 =$  0  
 Индукция 5 гарм., Тл 0,12  $Y4 =$  0  $Y8 =$  0  
 Индукция 7 гарм., Тл 0,013  $AL =$  20

РАСЧЕТ ЭДС

	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм
К-т укорочен $K_u =$	0,86603	1,2E-16	-0,86603	0,86603
К-т распредел. $K_p =$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,17683
Обмоточный к-т $K_o =$	0,83124	8,2E-17	-0,18892	-0,15314
Полюс. деление, м $T_v =$	0,20881	0,0696	0,04176	0,02983
Магн. поток, Вб $\Phi =$	0,02691	0,00472	0,00068	5,3E-05
Частота, Гц $f =$	50	150	250	350
ЭДС гармоники, В $E_v =$	4,96633	2,6E-16	-0,14258	-0,01252
ЭДС витка, В $E =$	4,96839		$W =$	76,4836

Коэффициент формы  $K_{\phi} =$  2,88192  $W_{ут} =$  84

Уточненная ЭДС фазы, В = 417,345

ВАРИАНТЫ ЗАДАНИЯ

ВАРИАНТ	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Напряжение, В $U_{\phi} =$	220	220	220	220	220	127	220	220	220	220
Число пар полюсов $p =$	1	3	2	4	2	2	4	3	3	1
тип обмотки $A_1 =$	1	1	2	2	2	1	2	1	2	2
	КОНЦ. ВР	КОНЦ.	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ЦШО	ДВУХСЛ	ПШО	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ
Число пазов, шт $Z =$	24	36	36	48	48	36	48	36	36	24
Диаметр статора, мм $D =$	82	112	200	230	265	112	230	152	200	140
Длина пакета, мм $L =$	66	78	80	80	135	78	140	144	140	94
Число витк. фазы $W =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Число парал. ветвей $A$	1	1	1	1	4	1	1	1	2	1
К-т укорочения $K_u =$	1	1	0,7	0,7	0,7	1	0,7	1	0,7	0,7
Индукция 1 гарм., Тл	0,65	0,74	0,885	0,8	0,9	0,735	0,805	0,72	0,885	0,57
Индукция 3 гарм., Тл	0,216	0,246	0,295	0,267	0,3	0,245	0,268	0,24	0,295	0,19
Индукция 5 гарм., Тл	0,13	0,148	0,177	0,16	0,18	0,147	0,161	0,144	0,177	0,114
Индукция 7 гарм., Тл	0,093	0,101	0,126	0,114	0,128	0,105	0,115	0,103	0,126	0,082

ВАРИАНТ	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Напряжение, В $U_{\phi} =$	127	380	380	220	220	127	220	220	380	127
Число пар полюсов $p =$	1	2	1	2	3	1	2	2	2	2
тип обмотки $A1 =$	2	2	2	1	1	1	2	2	1	2
	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ЦШО	КОНЦ	КОНЦ ВР	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ПШО	ДВУХСЛ
Число пазов, шт $Z =$	24	36	24	36	36	24	48	24	36	36
Диаметр статора, мм $D =$	200	266	155	120	320	96	112	168	186	399
Длина пакета, мм $L =$	140	213	125	100	280	68	78	132	152	318
Число витк. фазы $W =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Число парал. ветвей $A$	2	1	1	2	1	1	1	1	1	2
К-т укорочения $K_u =$	0,7	0,7	0,7	1	1	1	0,7	0,7	1	0,7
Индукция 1 гарм., Тл	0,89	0,88	0,88	0,95	0,95	0,95	0,95	0,65	0,86	0,87
Индукция 3 гарм., Тл	0,39	0,55	0,35	0,23	0,13	0,13	0,23	0,23	0,23	0,65
Индукция 5 гарм., Тл	0,13	0,13	0,11	0,11	0,09	0,09	0,1	0,1	0,13	0,1
Индукция 7 гарм., Тл	0,093	0,014	0,011	0,011	0,011	0,011	0,012	0,012	0,012	0,082

ВАРИАНТ	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Напряжение, В $U_f=$	380	220	220	127	380	127	220	380	127	220
Число пар полюсов $p=$	1	1	1	1	2	2	1	1	2	3
тип обмотки $A1=$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ	ДВУХСЛ
Число пазов, шт $Z=$	24	36	36	48	48	24	24	24	36	36
Диаметр статора, мм $D=$	233	256	256	95	198	154	140	150	180	160
Длина пакета, мм $L=$	188	188	188	65	165	144	94	94	120	133
Число витк. фазы $W=$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Число парал. ветвей $A$	1	1	1	1	1	1	1	2	1	1
К-т укорочения $K_u=$	0,7	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9
Индукция 1 гарм., Тл	0,94	0,92	0,92	0,92	0,92	0,96	0,94	0,94	0,94	0,94
Индукция 3 гарм., Тл	0,86	0,86	0,86	0,86	0,23	0,23	0,15	0,15	0,3	0,3
Индукция 5 гарм., Тл	0,19	0,2	0,2	0,2	0,2	0,09	0,114	0,114	0,114	0,114
Индукция 7 гарм., Тл	0,082	0,08	0,08	0,08	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

ОБОЗНАЧЕНИЯ ТИПА ОБМОТОК:

ДВУХСЛ - ДВУХСЛОЙНАЯ

ПШО - ПРОСТАЯ ШАБЛОННАЯ ОБМОТКА

ЦШО - ЦЕПНАЯ ШАБЛОННАЯ ОБМОТКА

ШОВ - ШАБЛОННАЯ ОБМОТКА "ВРАЗВАЛКУ"

КОНЦ - КОНЦЕНТРИЧЕСКАЯ

КОНЦ ВР - КОНЦЕНТРИЧЕСКАЯ "ВРАЗВАЛКУ"