

Документ подписан простой электронной подписью
Информация о владельце:
ФИО: Соловьев Дмитрий Александрович
Должность: ректор ФГБОУ ВО Вавиловский университет
Дата подписания: 09.06.2026 15:46:53
Уникальный программный ключ:
528682d78e671e566ab07f01fe1ba2172f735a12

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«Саратовский государственный университет генетики, биотехнологии и
инженерии имени Н. И. Вавилова»

М.А. Левин
Ю.В. Иванкина

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ.
АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Учебное пособие

Саратов 2026

УДК 621.313
ББК 31.621.63
Э 45

Рецензенты:

доцент кафедры «Электрооборудование, электротехнологии и электроснабжение» ФГБОУ ВО Вавиловский университет,
кандидат технических наук А.В. Волгин

Электрические машины. Асинхронные машины: Учебное пособие для студентов направления подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника / Сост.: Левин М.А., Иванкина Ю.В. // ФГБОУ ВО Вавиловский университет – Саратов:, 2026. – 123 с.

В учебном пособии рассмотрены вопросы конструкции и теории электрических машин и аппаратов, структура, содержание и оформление курсовой работы, даны методические указания к выполнению отдельных разделов работы, методические рекомендации по организации и проведению лабораторных работ по электрическим машинам, методические рекомендации по выполнению самостоятельной работы.

Предназначено для студентов высших учебных заведений обучающихся по направлению подготовки 13.03.02 Электроэнергетика и электротехника профиль «Электроснабжение».

УДК 621.313
ББК 31.621.63

© М.А. Левин, Ю.В. Иванкина, 2026
© ФГБОУ ВО Вавиловский университет, 2026

Введение

Для изучения дисциплины предусмотрены лекции, лабораторные работы, практические занятия, курсовое проектирование, самостоятельная работа.

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 сельском хозяйстве.

Электрические машины широко применяются во всех отраслях народного хозяйства, в, том числе в сельскохозяйственном производстве и быту сельского 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. СТРУКТУРА, СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Завершающим этапом изучения дисциплины «Электрические машины» является курсовое проектирование, цель которого систематизировать, расширить, углубить и закрепить теоретические знания студента. В процессе этой работы обучающийся приобретает навыки и опыт проектирования электрических машин.

Курсовая работа включает в себя расчетно-пояснительную записку и графическую часть. Каждый студент получает от преподавателя индивидуальное задание.

При проектировании студенту следует использовать справочный, нормативный, специальный периодический материал.

Расчетно-пояснительная записка содержит задание на проектирование, содержание, введение, основную часть, список использованной литературы. Объем расчетно-пояснительной записки 20-25 страниц на листах формата А4. При оформлении расчетно-пояснительной записки все справочные и нормативные материалы должны иметь ссылку на литературные источники.

Графическая часть работы содержит чертежи на формате А4 или А3, на которых изображаются схема-развертка обмотки, звезда фазных ЭДС, интегральные кривые намагничивания для трех моментов времени.

1.1 Цель и задачи 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_f не должен превышать 5 %.

Синхронный генератор дизельной электростанции работает в генераторном режиме и является источником электроэнергии только в периоды аварии 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
- результирующей 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.

Произвести расчет и конструирование окончательного варианта обмотки.

Произвести анализ вращающегося магнитного поля обмотки с помощью интегральной кривой намагничивания.

Содержание работы

1. Введение.

2. Предварительный расчет параметров обмотки.

2.1 Полусное деление τ .

2.2 Число пазов на полюс и фазу q .

2.3 Шаг обмотки y .

2.4 Угол сдвига ЭДС в соседних пазах α .

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. Расчет намагничивающих сил трехфазной обмотки.

6.1 Амплитудное значение намагничивающей силы одной секции.

6.2 Амплитудное значение намагничивающей силы одной фазы в расчете
на один полюс.

6.3 Амплитудное значение намагничивающей силы трехфазной
обмотки в расчете на один полюс.

7. Анализ вращающегося магнитного поля обмотки с помощью
интегральной кривой намагничивания.

8. Литература.

2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

2.1 Предварительный расчет параметров обмотки

2.1.1 Полюсное деление τ

Полюсным делением называется часть окружности статора, приходящаяся на один полюс. Полюсное деление измеряется и рассчитывается как в пазах статора Z , так и в линейных единицах (м). Для составления схемы обмотки полюсное деление рассчитывается в пазах статора и представляет собой число пазов статора приходящихся на один полюс:

$$\tau = \frac{Z}{2p}$$

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

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

2.1.2 Число пазов на полюс и фазу q

$$q = \frac{Z}{2pm'}$$

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 β – 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

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

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.

2.1.5.1 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 τ).

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.

2.1.5.2 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 2τ).

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 $W_1 = q \cdot p$, а двухслойной $W_2 = 2 \cdot q \cdot p$. 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_ν – действующее значение фазной ЭДС для ν - гармоника.

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

Расчет E_ν для любой гармоники проводится по следующей формуле:

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

Составляющие последней формулы рассчитываются следующим образом:

$W = 1$ виток

K_{ov} – обмоточный коэффициент по ν -гармонической составляющей:

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

K_{yv} – коэффициент укорочения по ν -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 ν -гармонической составляющей:

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

f_ν – частота ν - 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.

Φ_ν – магнитный поток ν - гармонической составляющей:

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

При расчете Φ_ν полюсное деление τ 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 индуцируемой 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_ϕ необходимо внести изменения в исходные данные и выполнить весь расчет заново.

Следует учитывать, что на величину K_ϕ 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_ϕ , часто приходится прибегать к изменению всех 3-х величин.

Работа по оптимизации K_ϕ проводится по следующей методике. Вводятся исходные данные и производится расчет. Если $K_\phi > 5$ %, то 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 β уменьшается от 1,0 до 0,8. Полученный результат распечатывается и анализируется. Допустим, что K_ϕ уменьшился, но все еще больше 5%. Тогда следующим шагом принимаем $\beta = 0,6$. Предположим, что K_ϕ в этом случае увеличивается. Это означает, что оптимальное значение K_ϕ уже пройдено и, чтобы его отыскать, нужно изменять β с меньшими интервалами.

Если путем изменения коэффициента укорочения шага не удастся обеспечить желаемую величину K_ϕ , 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_ϕ . В пояснительную записку подшиваются 5–6 расчетов. На каждом 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 $W_{\text{Э}}$. Оно зависит от конструкции обмотки. Для однослойных обмоток $W_{\text{Э}}$ находится по формуле:

$$W_{\text{Э}} = \frac{W_{II}}{pq},$$

для двухслойных обмоток – $W_{\text{Э}} = \frac{W_{II}}{2pq}.$

Как правило, при расчете $W_{\text{Э}}$ 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:

$$W_K = q * W_C.$$

Затем рассчитывается окончательное число витков фазы:

- для однослойной обмотки: $W_{\phi} = p * q * W_C,$

– для двухслойной обмотки: $W_{\phi} = 2p * q * W_c$.

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

$$E_{\phi} = E * W_{\phi},$$

$$E_{\phi} \geq U_{\phi}.$$

2.5 Расчет намагничивающих сил трехфазной обмотки

Анализ намагничивающих сил (НС) проводится для рассчитанной и выбранной в пункте 2.4. трехфазной обмотки генератора резервной электростанции. По условиям задачи, при нормальном электроснабжении данный генератор работает режиме синхронного электродвигателя и приводит в действие компрессор для подачи сжатого воздуха в цех переработки продукции.

Параметры обмотки, схема, число витков фазы W_{ϕ} рассчитаны и указаны в пункте 2.4. С целью упрощения расчетов принимаем, что по обмоткам протекает намагничивающий ток фазы (ток холостого хода) $I=1$ А.

2.5.1 Амплитудное значение намагничивающей силы одной секции

Амплитудное значение НС складывается из бесконечного числа гармонических составляющих. В данном расчете следует учитывать только 1,3,5 и 7 гармоники.

Амплитудное значение НС одной секции для любой гармонической составляющей рассчитывают по формуле:

$$F_{mcs} = \frac{0,9IW_c}{\nu},$$

где I – величина тока, в данном расчете условно принято $I=1$ А.

2.5.2 Амплитудное значение намагничивающей силы одной фазы в расчете на один полюс

Как и в предыдущем случае, расчет ведется только для 1,3,5 и 7 гармонических составляющих. Расчетная формула

$$F_{\phi\nu} = \frac{0,9 * I * W_{\phi} AK_{ov}}{p\nu}.$$

где A – число параллельных ветвей обмотки.

2.5.3 Амплитудное значение намагничивающей силы трехфазной обмотки в расчете на один полюс

НС трехфазной обмотки рассчитывают для 1,3,5 и 7 гармонических составляющих. НС любой гармонической составляющей трехфазной обмотки в 1,5 раза больше НС этой гармоники создаваемой однофазной обмоткой.

$$F_{3\phi\nu} = 1,5f_{\phi\nu}$$

2.6 Анализ вращающегося магнитного поля обмотки статора с помощью интегральной кривой намагничивания

Анализ магнитного поля, создаваемого обмоткой, можно провести по интегральной кривой намагничивания. Интегральная кривая намагничивания (ИКН) представляет собой графическое изображение пространственного распределения суммарной НС трех фаз обмотки по пазам расточки статора. В соответствии с современными представлениями о магнитном поле считается, что НС обмотки изменяется скачком на величину полного тока ($W_c * I$), протекающего в местах расположения проводников, т.е. в пазах статора), и не изменяется на участках, не имеющих проводников с током (т.е. в междупазном пространстве). Направление скачка НС при этом определяется направлением тока в катушке. Поскольку для НС применим принцип наложения, то НС, создаваемые различными сторонами секций, находящимися в одном пазу, складываются алгебраически. Отсюда следует, что распределение НС в пространстве в каждый конкретный момент времени однозначно определено

положением секционных сторон в пазах, т.е. схемой обмотки. Так как токи в фазах обмотки изменяются во времени по синусоидальному закону, то и суммарная НС паза не остается постоянной, а перемещается в пространстве в соответствии с изменением токов. В результате в неподвижном статоре возникает вращающаяся волна НС. Ее отличительный признак заключается в том, что с течением времени максимальное значение НС обмотки изменяет свое положение в пространстве, т.е. последовательно переходит из одного паза в другой в строгом соответствии с поворотом звезды фазных токов во времени на векторной диаграмме. На развертке статора вращающаяся волна НС будет представляться бегущей волной НС.

Анализ ИКН позволяет оценить изменение пространственного положения НС (вращение по расточке статора или поступательное движение по развертке расточки статора) в зависимости от изменения мгновенного значения токов во времени.

Для этого ИКН строится для трех значений звезды фазных токов:

$t_1 = 0$ (условно прием, что в этом положении ток фазы C_1 равен максимальному значению $i_{c_1} = 1$ А);

$t_2 = 30$ эл. град. Вектор тока i_{c_1} повернут относительно первоначального положения на 30 эл. градусов против часовой стрелки;

$t_3 = 60$ эл. град. Вектор тока i_{c_1} повернут относительно первоначального положения на 60 эл. градусов против часовой стрелки.

Методика построения ИКН заключается в следующем. Для принятого окончательного варианта схемы обмотки строится развертка торцевой схемы. Для удобства дальнейших построений секции фазы C_1 обозначаются кружком, фазы C_2 – треугольником, фазы C_3 – прямоугольником.

Затем строим звезду фазных токов для момента времени t_0 . Согласно условию вектор i_{c_1} должен быть направлен вертикально вверх. Вектор i_{c_2} смещен относительно него на 120 эл. град., а i_{c_3} на 240 эл. град.

Считаем, что вектор i_{c_1} имеет положительное значение (находится выше оси абсцисс), а вектор i_{c_2} и i_{c_3} – отрицательные. Соответственно на торцевой схеме развертки ток i_{c_1} направлен от начала фазы к концу и обозначается крестом (\times), i_{c_2} и i_{c_3} – от конца к началу и обозначается точкой (\bullet). По абсолютной величине $i_{c_1} = 1$, а $i_{c_2} = i_{c_3} = -0,5$, соответственно $i_{c_4} = -1$, а $i_{c_5} = i_{c_6} = 0,5$.

Обозначим на схеме фазные зоны секционных сторон C_1, C_4, C_2, C_5, C_6 .

Далее строим график распределения токов по пазам статора вдоль его развертки. Для этого под соответствующим пазом откладывают в соответствующих направлениях и в принятом масштабе ступеньки, величина которых равна алгебраической сумме токов, протекающих в пазу. Затем строится интегральная кривая НС обмотки. Построение идет следующим образом. На графике откладывается величина полного тока первого паза. Его величина не изменяется в промежутке между 1-м и 2-м пазами, а во 2-м пазу изменяется скачком на величину полного тока 2-го паза. Причем изменение может быть как положительным, так и отрицательным, в зависимости от того, совпадает или нет направление токов в пазах. Затем в промежутке между 2-м и 3-м пазами значение НС не изменяется, а в 3-м пазу изменяется скачком на величину полного тока. Дальнейшее построение происходит аналогично. Полученную кривую разделяют осью абсцисс таким образом, чтобы амплитуды положительной и отрицательной полуволн были одинаковы.

Затем приступают к построению ИНК для $t_2 = 30$ эл. град. Для этого звезда фазных токов поворачивается против часовой стрелки на 30 эл. град. от первоначального положения. Определяются величины и направления токов по фазным зонам (для данного случая $i_{c_1} = i_{c_6} = 0,86$; $i_{c_3} = i_{c_4} = -0,86$; $i_{c_2} = i_{c_5} = 0$). Эти данные наносятся на развертку торцевой схемы, и по ним строится график распределения тока по пазам расточки статора.

Затем построение повторяется для $i_{c_1} = 60$ эл. град.

В том случае, если схема обмотки выбрана верно и построение не содержит ошибок, с каждым поворотом звезды пазовых ЭДС на пэл. град. во времени интегральная кривая намагничивающих сил смещается по статору на пэл. град. в пространстве. Это и служит критерием правильного выбора обмотки.

ПРИМЕР ВЫПОЛНЕНИЯ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Курсовая работа выполняется в соответствии с содержанием приведенном в п. 1.1.

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

Исходные данные (пример)

Вариант №

Фазное напряжение $U_{\phi} = 220$ В.

Число пар полюсов $p = 2$.

Тип обмотки, однослойная концентрическая— $A_1 = 1$

Число пазов $Z = 36$

Диаметр статора $D = 120$ мм.

Длина пакета статора $L = 100$ мм.

Коэффициент укорочения $\beta = 0,7$

Составляющие индукции создаваемой ротором:

Индукция 1-й гармоники $B_1 = 0,95$ Тл.

Индукция 3-й гармоники $B_3 = 0,36$ Тл.

Индукция 5-й гармоники $B_5 = 0,25$ Тл.

Индукция 7-й гармоники $B_7 = 0,010$ Тл.

2.1 Предварительный расчет параметров обмотки

2.1.1 Полюсное деление τ

Полюсным делением называется число пазов статора, приходящихся на

один полюс:

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

2.1.2 Число пазов на полюс и фазу q

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

2.1.3 Шаг обмотки y

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

Однослойные концентрические обмотки имеют несколько шагов, так называемых частичных шагов. Число частичных шагов равно числу пазов на полюс и фазу. Величина частичных шагов рассчитывается по формуле:

$$y_i = 2(q + (q - j)) + 1$$

где j -номер секции, принимает 1 до q ($j= 1, 2, 3$).

Для $j = 1$

$$y_1 = 2 \cdot [3 + (3 - 1)] + 1 = 11 \text{ пазов}$$

Для $j = 2$

$$y_2 = 2 \cdot [3 + (3 - 2)] + 1 = 9 \text{ пазов}$$

Для $j = 3$

$$y_3 = 2 \cdot [3 + (3 - 3)] + 1 = 7 \text{ пазов}$$

2.1.4. Угол сдвига ЭДС в соседних пазлах статора α

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

2.1.5. 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 $Z = 36; 2p = 4$:

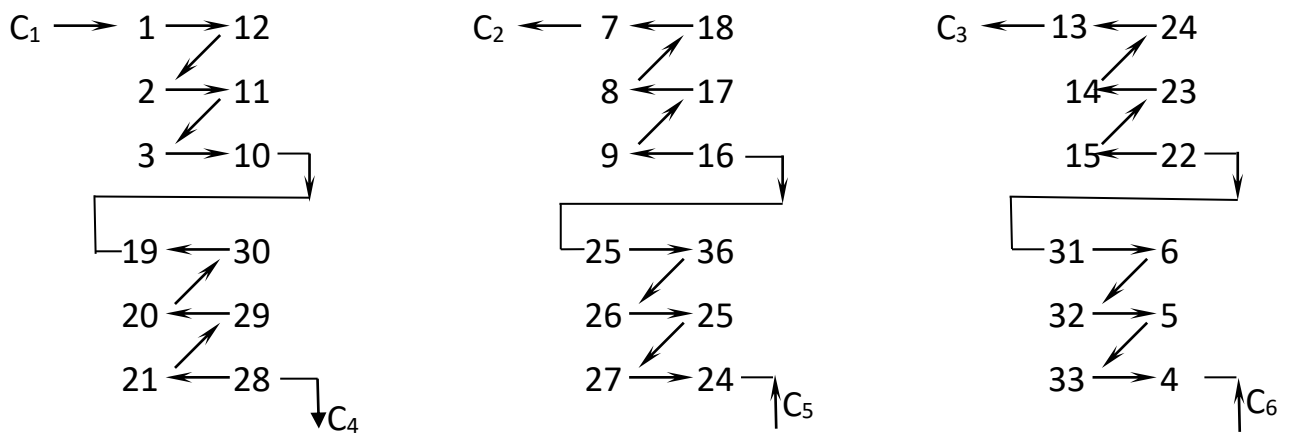


Рисунок 1 - Схема таблица предварительного варианта обмотки статора:

$Z = 36; 2p = 4; \tau = 9; y_1 = 11; y_2 = 9; y_3 = 7$, тип обмотки – однослойная.

2.2 Расчет результирующей ЭДС витка с учетом высших гармонических составляющих

2.2.1 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:

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

Составляющие последней формулы рассчитываются следующим образом:

$$W = 1 \text{ виток.}$$

K_{ov} – обмоточный коэффициент по ν -гармонической составляющей:

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

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

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

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

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

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

Частота любой гармоники рассчитывается по формуле:

$$f_{\nu} = \nu f$$

где f – частота сети, $f = 50$ Гц.

Φ_{ν} – магнитный поток ν -гармонической составляющей

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

При расчете Φ_{ν} полюсное деление τ следует измерять в линейных единицах, м:

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

2.2.2 Расчет 1, 3, 5 и 7 гармонических составляющих и результирующей ЭДС витка

ЭДС 1-й гармонической составляющей. Учитываем, что по условию $W = 1$, а также, что для однослойной обмотки $K_{yv} = 1,0$, и рассчитываем:

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

- обмоточный коэффициент $K_{o1} = 1 \cdot 0,95984 = 0,95984$,

- частота ЭДС $f_1 = 1 \cdot 50 = 50$ Гц

Магнитный поток 1-й гармонической составляющей:

$$\Phi_v = \frac{2 * 0,95 * 0,1 * 0,94}{3,14 * 1} = 5,7 * 10^{-3} \text{ Вб.}$$

Полюсное деление, выраженное в линейных единицах, м:

$$\tau = \frac{\pi D}{2p} = \frac{3,14 * 0,12}{2 * 2} = 0,094$$

Действующее значение ЭДС

$$.E_1 = 4,44 * 50 * 1 * 5,7 * 10^{-3} * 0,96 = 1,21 \text{ В.}$$

Аналогично рассчитывают для 3, 5 и 7 гармонических составляющих.

Действующее значение фазной ЭДС одного витка обмотки с учетом высших гармонических составляющих:

$$E = \sqrt{1,21^2 + 0,32^2 + (7,26 * 10^{-2})^2 + (2,36 * 10^{-2})^2} = 1,258 \text{ В.}$$

2.3Улучшение качества индуктируемой ЭДС

2.3.1 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. $K_\phi < 5 \%$.

$$\text{Рассчитаем коэффициент формы: } K_\phi = \frac{\sqrt{0,32^2 + 0,0726^2 + 0,236^2}}{1,21} = 27,07\%$$

Так как $K_\phi = 27,07 > 5 \%$, то необходимо вносить изменения в исходные данные, считая, что они определены неверно.

2.3.2 Улучшение гармонического состава ЭДС

Работу по улучшению гармонического состава ЭДС проводим с помощью 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.

В соответствии с рекомендациями изменяем тип обмотки с однослойной на двухслойную и задаем $\beta=0,9$. Полученное значение $K_\phi = 23,49 \%$. Уменьшение коэффициента формы объясняется уничтожением высших гармонических составляющих, которое происходит за счет изменения фазовых сдвигов ЭДС высших гармоник в пазах. Математическое подтверждение этому явлению хорошо иллюстрирует изменение коэффициента укорочения $K_{ув}$ для различных гармоник. Сравнение показывает, каким образом изменяется величина высших гармонических составляющих для различных коэффициентов по шагу.

Так как полученное значение $K_\phi > 5 \%$, уменьшаем β до 0,8 и вновь делаем полный расчет ЭДС обмотки. Величина $K_\phi = 14,14 \%$ превышает допустимое значение по ГОСТ.

Принимаем $\beta= 0,7$ и получаем $K_\phi = 6,28 \%$, что также недопустимо.

Делаем пробный расчет для $\beta= 0,6$. В результате $K_\phi = 18,69 \%$. Увеличение K_ϕ говорит о том, что изменением конструкции обмотки (т.е. увеличением или уменьшением шага обмотки) не удастся получить желаемый результат и следует использовать другой метод улучшения гармонического состава.

В соответствии с рекомендациями изменяем гармонический состав магнитного потока ротора. Учитывая, что при $\beta=0,7$ 3-я гармоническая

магнитного потока уничтожается (т.к. $K_{yI}=0$). Уменьшим значение 5-й гармонической составляющей магнитной индукции с 0,25 до 0,15 Тл и выполним расчет заново при $\beta=0,7$.

В результате расчетов получен $K_{\phi} = 4,07 \%$, что отвечает требованиям ГОСТ.

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

2.3 Расчет и конструирование окончательного варианта обмотки

2.3.1 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).

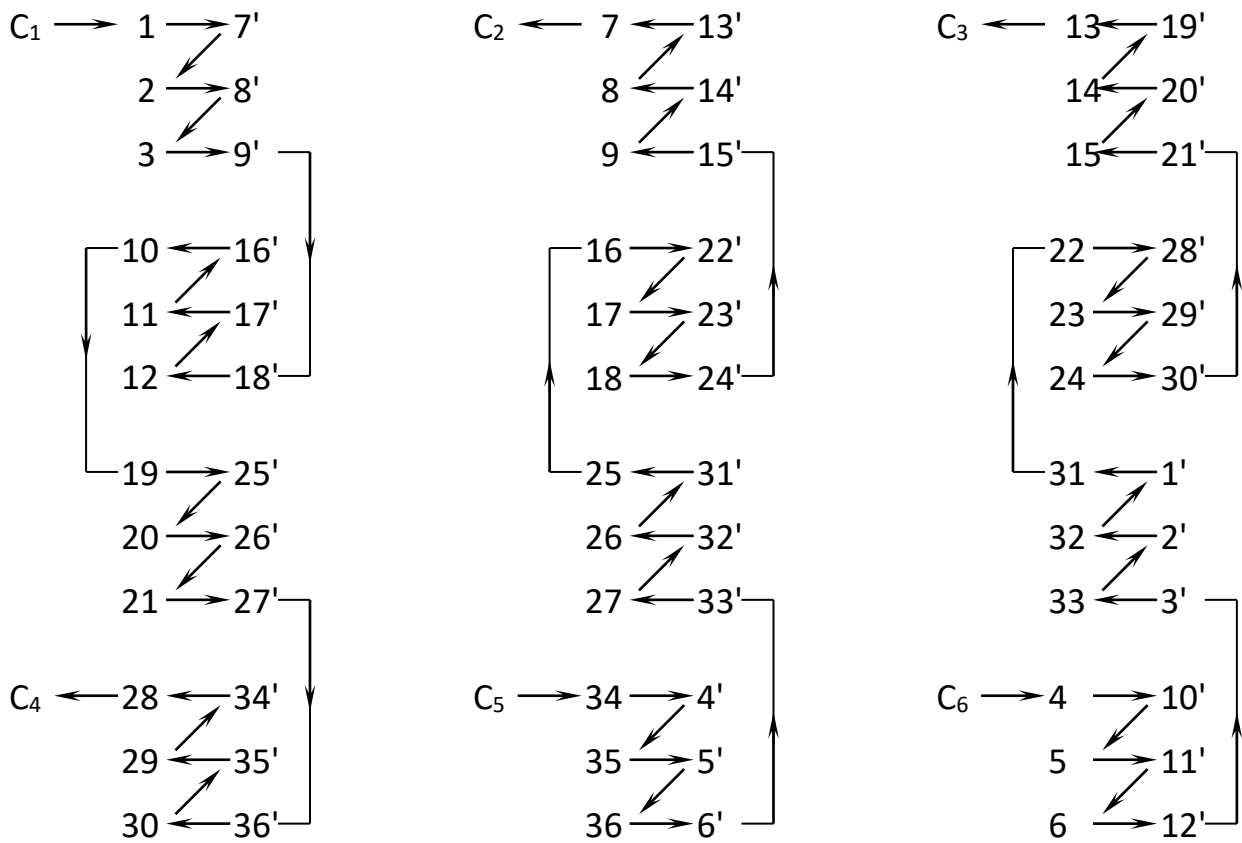
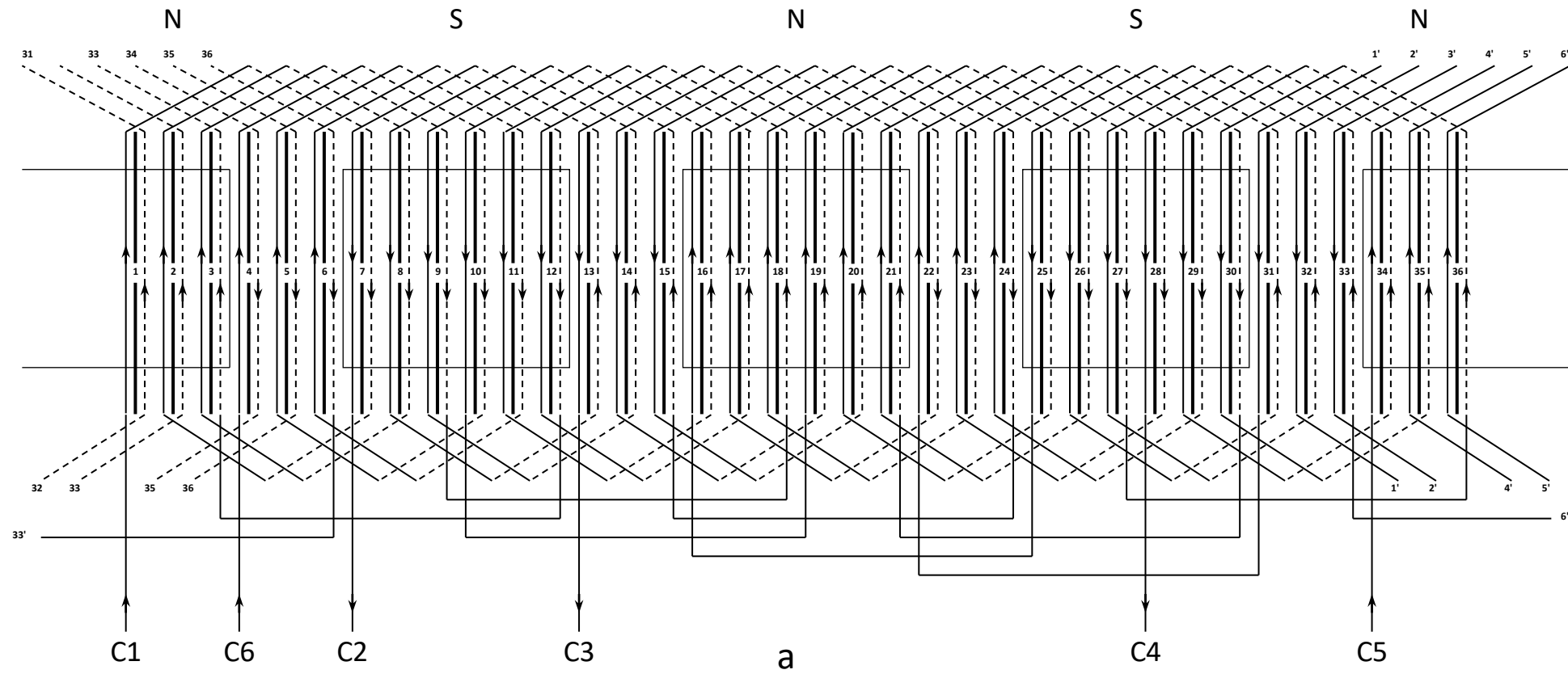


Рисунок 2 - Схема таблицы окончательного варианта обмотки статора:

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

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



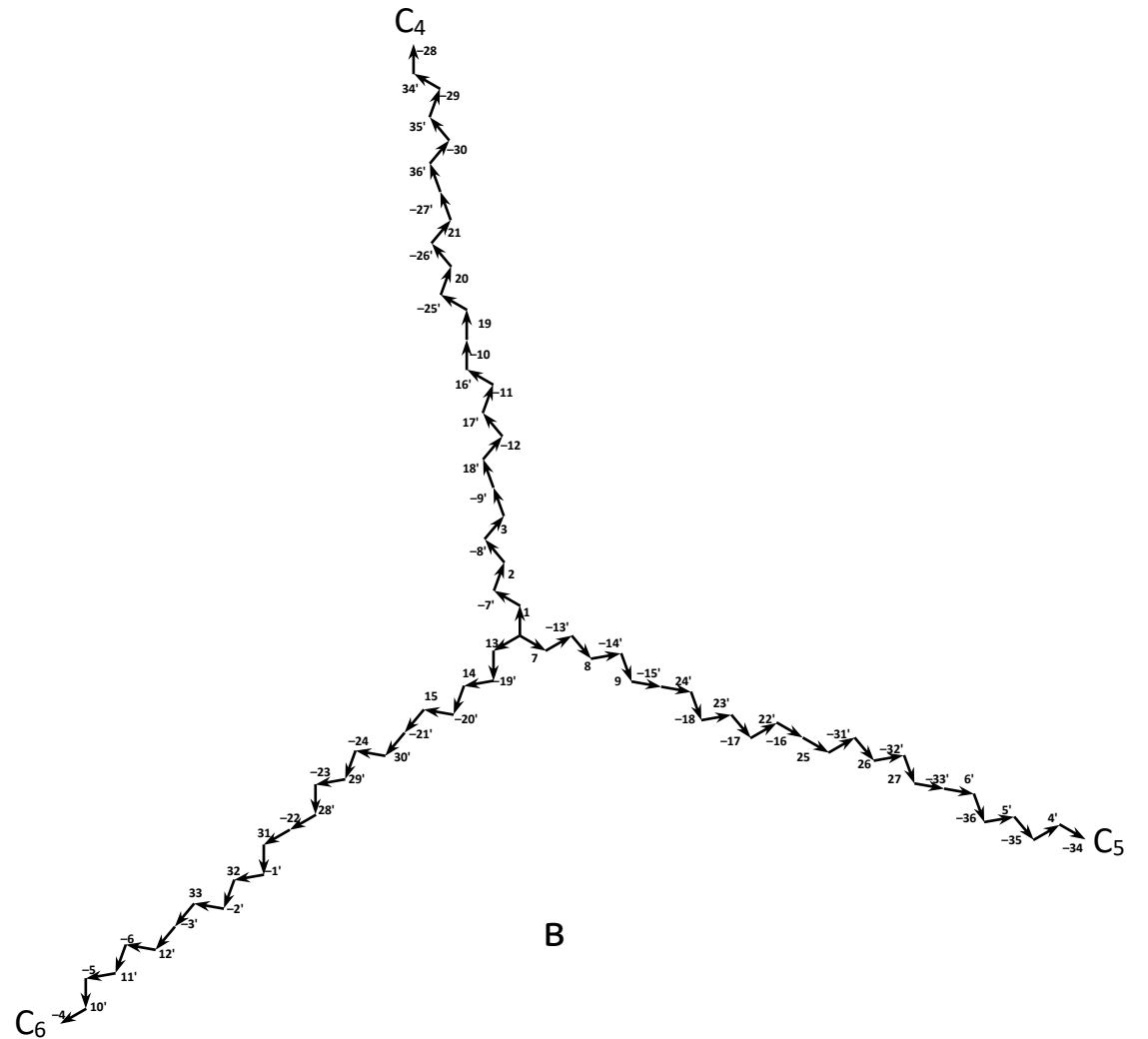
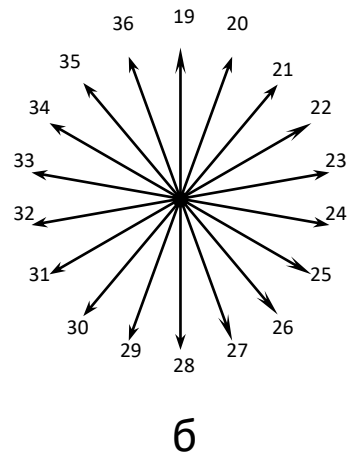


Рисунок 3 - Схема-развертка окончательного варианта: а – обмотка статора; б – звезда пазовых ЭДС; в – звезда фазных ЭДС обмотки.

Данные обмотки. $Z=36$; $2p=4$; $\tau=9$; $y=6$; $\beta=0,7$; $\alpha=20$ эл. град.

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

2.3.2 Расчет числа витков секции, катушечной группы, и фазы обмотки

Рассчитаем предварительное число витков фазы:

$$W_{\pi} = \frac{U_{\phi}}{E} = \frac{220}{1,0527} = 208,98 \text{ витков.}$$

Вычислим число эффективных витков секции W_{ε} , для двухслойных обмоток:

$$W_{\varepsilon} = \frac{W_{\pi}}{2 * p * q} = \frac{208,9}{2 * 2 * 3} = 17,41 \text{ витков.}$$

Округляем полученное значение до ближайшего большего и получаем $W_{\varepsilon} = 18$.

Рассчитаем число витков катушечной группы:

$$W_{к} = q * W_{\varepsilon} = 3 * 18 = 54 \text{ витка.}$$

Найдем окончательное число витков фазы:

$$W_{\phi} = 2pW_{к} = 2 * 2 * 54 = 216 \text{ витков.}$$

По окончательному числу витков фазы определим величину индуктируемой ЭДС:

$$E = 216 * 1,0527 = 227,38 \text{ В.}$$

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

2.4 Расчет намагничивающих сил трехфазной обмотки

2.4.1 Амплитудное значение намагничивающей силы секции

Амплитудное значение НС складывается из бесконечного числа гармонических составляющих. В данном расчете следует учитывать только 1,3,5 и 7 гармоники:

- а) расчет амплитуды 1^й гармонической составляющей НС секции

$$F_{mc1} = \frac{0,9IW_c}{\nu} = 0,9 * 1 * 18 = 16,2 \text{ А.}$$

- б) расчет амплитуды 3^й гармонической составляющей НС секции

$$F_{mc3} = \frac{0,9IW_c}{\nu} = 0,9 * 1 * \frac{18}{3} = 5,4 \text{ А.}$$

- в) расчет амплитуды 5^й гармонической составляющей НС секции

$$F_{mc5} = \frac{0,9IW_c}{\nu} = 0,9 * 1 * \frac{18}{5} = 3,24 \text{ А.}$$

- г) расчет амплитуды 7^й гармонической составляющей НС секции

$$F_{mc7} = \frac{0,9IW_c}{\nu} = 0,9 * 1 * \frac{18}{7} = 2,31 \text{ А.}$$

2.4.2 Амплитудное значение намагничивающей силы одной фазы в расчете на один полюс

Как и в предыдущем пункте, расчет ведем только для 1,3,5 и 7 гармонических составляющих. Расчетная формула

$$F_{\phi\nu} = \frac{0,9 * I * W_{\phi} AK_{ov}}{p\nu}.$$

- а) Расчет 1 гармонической составляющей НС одной фазы на один полюс.

$$F_{\phi1} = \frac{0,9*1*216*0,96}{2*1} = 93,31 \text{ А.}$$

- б) Расчет 3 гармонической составляющей НС одной фазы на один

ПОЛЮС.

$$F_{\phi 3} = \frac{0,9 * 1 * 216 * 0,67}{2 * 3} = 21,71 \text{ A}$$

в) Расчет 5 гармонической составляющей НС одной фазы на один полюс

$$F_{\phi 5} = \frac{0,9 * 1 * 216 * 0,22}{2 * 5} = 4,28 \text{ A}$$

г) Расчет 7 гармонической составляющей НС одной фазы на один

ПОЛЮС.

$$F_{\phi 7} = \frac{0,9 * 1 * 216 * (-0,18)}{2 * 7} = -2,50 \text{ A}$$

2.4.3 Амплитудное значение намагничивающей силы трехфазной обмотки в расчете на один полюс

НС любой гармонической составляющей трехфазной обмотки в 1,5 раза больше НС этой гармоники создаваемой однофазной обмоткой.

$$F_{3\phi v} = 1,5 f_{\phi v}$$

отсюда получаем:

$$F_{3\phi 1} = 1,5 * 93,31 = 139,96 \text{ A},$$

$$F_{3\phi 3} = 1,5 * 21,71 = 32,56 \text{ A},$$

$$F_{3\phi 5} = 1,5 * 4,28 = 6,42 \text{ A},$$

$$F_{3\phi 7} = 1,5 * (-2,50) = -3,75 \text{ A}.$$

2.5 Анализ вращающегося магнитного поля обмотки статора с помощью интегральной кривой намагничивания

Так как производственная ситуация предусматривает использование синхронного генератора в режиме электродвигателя, то необходимо провести анализ качества вращающегося магнитного поля статора. Анализ проводим по методике описанной в п. 2.6.

Строим развертку торцевой схемы окончательного варианта обмотки с указанием направлений токов в секционных сторонах (рис. 4а). Затем строим звезду фазных ЭДС для момента времени $t_0=0$; (рис 4б) и определяем по ней

мгновенные значения токов фазы. По полученным данным строим кривую НС пазов (рис. 4в).

Для этого суммируем НС секционных сторон, лежащих в одном пазу. При суммировании учитываем направления токов в секциях. По полученной кривой НС в соответствии с п.2.6. строим интегральную кривую намагничивания (рис.4 г).

Аналогично строим интегральную кривую для момента времени $t_2=30$ эл. град. (рис. 5).

В качестве анализа сопоставим положение оси положительной полувоины ИКН для моментов времени t_1 и t_2 . При $t_1 = 0$ она находится между 4 и 5 пазами, а при повороте звезды фазных токов на 30 эл. градусов во времени (момент времени t_2) ось положительной полувоины смещается на 30 электрических градусов в пространстве и занимает положение по центру 6-го паза. При повороте звезды токов на 60 эл. градусов ($t_3=60$ эл.гр.) ось положительной полувоины сместится на 60 электрических градусов в пространстве.

Если данные условия выполняются, то обмотка выбрана верно и при подключении к системе трехфазных токов на статоре образуется вращающееся магнитное поле.

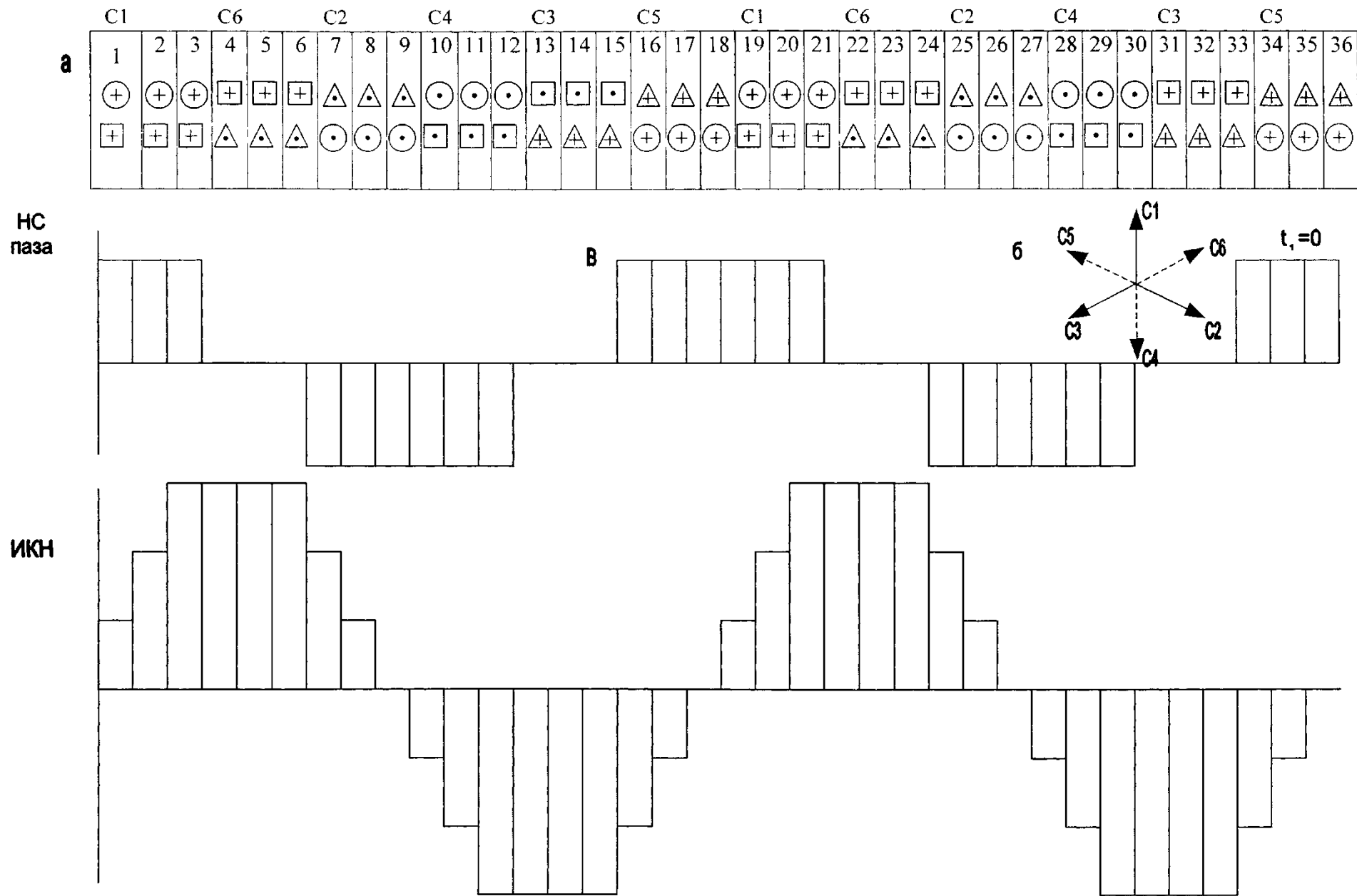


Рисунок 4 - Интегральная кривая намагничивания обмотки для $t_1=0$. а - развертка торцевой схемы обмотки статора; б - временная диаграмма токов статора для $t_1=0, i_{c1} = -1, i_{c2} = i_{c3} = -0,5, i_{c5} = i_{c6} = 0,5, i_{c4} = -1$; в - кривая Н.С. паза.; г - интегральная кривая намагничивания

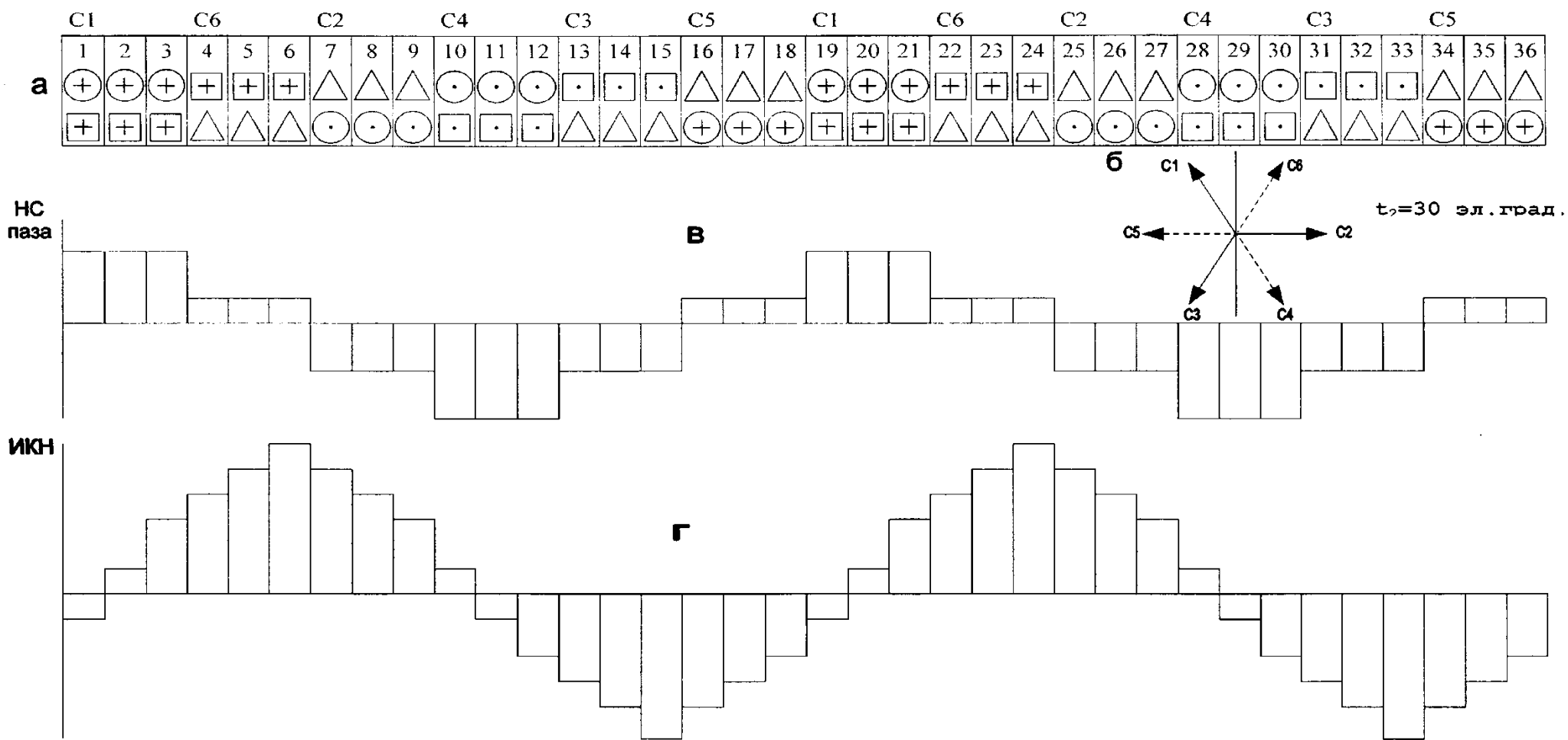


Рисунок 5 - Интегральная кривая намагничивания обмотки для $t_2=30$ эл.град: а - развертка торцевой схемы обмотки статора; б - временная диаграмма токов статора для $t_2=30$ эл.гр. $i_{c1}=i_{c6}=0,86$, $i_{c2}=i_{c5}=0$, $i_{c3}=i_{c4}=-0,86$; в - кривая Н.С. паза.; г - интегральная кривая намагничивания обмотки.

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ							
ВАРИАНТ							
Напряжение, В $U\phi=$	220		РАСЧЕТ				
Число пар полюсов $p=$	2		ПАРАМЕТРОВ				
тип обмотки $A1=$	1		ОБМОТКИ				
	Односл.						
Число пазов, шт $Z=$	36						
Диаметр статора, мм $D=$	120		$P=$	2			
Длина пакета, мм $L=$	100		$T=$	9			
Условное число витков $W=$	1		$q=$	3			
Число парал. ветвей A	1						
К-т укорочения $\beta=$	1	$Y1=$	11				
Индукция 1 гарм., Тл	0,95	$Y2=$	9				
Индукция 3 гарм., Тл	0,36	$Y3=$	7				
Индукция 5 гарм., Тл	0,25						
Индукция 7 гарм., Тл	0,10		$AL=$	20			
РАСЧЕТ ЭДС							
	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм			
К-т укорочен $K_y=$	1	1	1	1			
К-траспед. $K_p=$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,1768			
Обмоточный к-т $K_o=$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,1768			
Полюс.деление, м $\tau_v=$	0,0942	0,0314	0,01884	0,01346			
Магн.поток, Вб $\Phi=$	0,0057	0,00072	0,0003	$8,6 \cdot 10^{-5}$			
Частота, Гц $f=$	50	150	250	350			
ЭДС гармоника, В $E_v=$	1,21458	0,31983	0,07264	-0,0236			
ЭДС витка, В $E=$	1,258299		$W=$	174,8393			
Коэффициент формы $K_\phi=$	27,07265		$W_{ym}=$	180			
Уточненная ЭДС фазы, В =	226,4489						

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
ВАРИАНТ				
Напряжение, В $U_{\phi} =$	220		РАСЧЕТ	
Число пар полюсов $p =$	2		ПАРАМЕТРОВ	
тип обмотки $A1 =$	2		ОБМОТКИ	
	Двухсл.			
Число пазов, шт $Z =$	36			
Диаметр статора, мм $D =$	120		$P =$	2
Длина пакета, мм $L =$	100		$T =$	9
Условное число витков $W =$	1		$q =$	3
Число парал.ветвей A	1		$Y =$	8
К-т укорочения $\beta =$	0,9			
Индукция 1 гарм., Тл	0,95			
Индукция 3 гарм., Тл	0,36			
Индукция 5 гарм., Тл	0,25			
Индукция 7 гарм., Тл	0,10		$AL =$	20
	РАСЧЕТ ЭДС			
	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм
К-т укорочен $K_y =$	0,98481	-0,866	0,64279	-0,342
К-т распредел. $K_p =$	0,98481	0,66697	0,21815	-0,1768
Обмоточный к-т $K_o =$	0,94525	-0,5776	0,14022	0,06048
Полюс.деление, м $T_v =$	0,0942	0,0314	0,01884	0,01346
Магн.поток, Вб $\Phi =$	0,0057	0,00072	0,0003	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Частота, Гц $f =$	50	150	250	350
ЭДС гармоники, В $E_v =$	1,19612	-0,277	0,04669	0,00806
ЭДС витка, В $E =$	1,22868		$W =$	179,052
Коэффициент формы, $K_{\phi} =$	23,4927		$W_{yt} =$	180
Уточненная ЭДС фазы, В $E =$	221,163			

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
ВАРИАНТ				
Напряжение, В $U\phi=$	220		РАСЧЕТ	
Число пар полюсов $p=$	2		ПАРАМЕТРОВ	
тип обмотки $A1=$	2		ОБМОТКИ	
	Двухсл.			
Число пазов, шт $Z=$	36			
Диаметр статора, мм $D=$	120		$P=$	2
Длина пакета, мм $L=$	100		$T=$	9
Условное число витков $W=$	1		$q=$	3
Число парал. ветвей A	1		$Y=$	7
К-т укорочения $\beta=$	0,8			
Индукция 1 гарм.,Тл	0,95			
Индукция 3 гарм.,Тл	0,36			
Индукция 5 гарм.,Тл	0,25			
Индукция 7 гарм.,Тл	0,10		$AL=$	20
	РАСЧЕТ ЭДС			
	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм
К-т укорочен $K_y=$	0,93969	-0,5	-0,1736	0,76604
К-траспред. $K_p=$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,1768
Обмоточный к-т $K_o=$	0,90195	-0,3335	-0,0379	0,06048
Полюс.деление, $mT_v=$	0,0942	0,0314	0,01884	-0,01346
Магн.поток, Вб $\Phi=$	0,0057	0,00072	0,0003	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Частота, Гц $f=$	50	150	250	350
ЭДС гармоника, В $E_v=$	1,19612	-0,1599	-0,0126	-0,018
ЭДС витка, В $E=$	1,15287		$W=$	190,8
Коэффициент формы, $K_\phi=$	14,1433		$W_{yt}=$	192
Уточненная ЭДС фазы, В $E=$	221,315			

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
ВАРИАНТ				
Напряжение, В $U\phi=$	220		РАСЧЕТ	
Число пар полюсов $p=$	2		ПАРАМЕТРОВ	
тип обмотки $A1=$	2		ОБМОТКИ	
	Двухсл.			
Число пазов, шт $Z=$	36			
Диаметр статора, мм $D=$	120		$P=$	2
Длина пакета, мм $L=$	100		$T=$	9
Условное число витков $W=$	1		$q=$	3
Число парал. ветвей A	1		$Y=$	6
К-т укорочения $\beta=$	0,7			
Индукция 1 гарм., Тл	0,95			
Индукция 3 гарм., Тл	0,36			
Индукция 5 гарм., Тл	0,25			
Индукция 7 гарм., Тл	0,10		$AL=$	20
	РАСЧЕТ ЭДС			
	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм
К-т укорочен $K_y=$	0,86603	0	-0,866	0,86603
К-т распредел. $K_p=$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,1768
Обмоточный к-т $K_o=$	0,83124	0	-0,1889	-0,1531
Полюс. деление, м $T_v=$	0,0942	0,0314	0,01884	-0,01346
Магн.поток, Вб $\Phi=$	0,0057	0,00072	0,0003	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Частота, Гц $f=$	50	150	250	350
ЭДС гармоника, В $E_v=$	1,05185	0	-0,0629	-0,0204
ЭДС витка, В $E=$	1,053931		$W=$	208,74
Коэффициент формы, $K_\phi=$	6,2875		$W_{yt}=$	210
Уточненная ЭДС фазы, В $E=$	221,3254			

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
ВАРИАНТ				
Напряжение, В $U_{\phi} =$	220		РАСЧЕТ	
Число пар полюсов $p =$	2		ПАРАМЕТРОВ	
тип обмотки $A_1 =$	2		ОБМОТКИ	
	Двухсл.			
Число пазов, шт $Z =$	36			
Диаметр статора, мм $D =$	120		$P =$	2
Длина пакета, мм $L =$	100		$T =$	9
Условное число витков $W =$	1		$q =$	3
Число парал. ветвей A	1		$Y =$	5
К-т укорочения $\beta =$	0,6			
Индукция 1 гарм., Тл	0,95			
Индукция 3 гарм., Тл	0,36			
Индукция 5 гарм., Тл	0,25			
Индукция 7 гарм., Тл	0,10		$AL =$	20
	РАСЧЕТ ЭДС			
	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм
К-т укорочен $K_y =$	0,76604	0.5	-0,9397	-0.1736
К-т распредел. $K_p =$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,1768
Обмоточный к-т, $K_o =$	0,73528	0.33349	-0,205	0.03071
Полюс. деление, м $T_v =$	0,0942	0,0314	0,01884	0.01246
Магн. поток, Вб $\Phi =$	0,0057	0,00072	0,0003	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Частота, Гц $f =$	50	150	250	350
ЭДС гармоника, В $E_v =$	0.93042	0.15991	-0,0683	0.00409
ЭДС витка, В $E =$	0.9465		$W =$	232.42
Коэффициент формы, $K_{\phi} =$	18.69		$W_{yt} =$	234
Уточненная ЭДС фазы, В $E =$	221,4892			

ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ				
ВАРИАНТ				
Напряжение, В $U_{\phi} =$	220		РАСЧЕТ	
Число пар полюсов $p =$	2		ПАРАМЕТРОВ	
тип обмотки $A1 =$	2		ОБМОТКИ	
	Двухсл.			
Число пазов, шт $Z =$	36			
Диаметр статора, мм $D =$	120		$P =$	2
Длина пакета, мм $L =$	100		$T =$	9
Условное число витков $W =$	1		$q =$	3
Число парал. ветвей A	1		$Y =$	6
К-т укорочения $\beta =$	0,7			
Индукция 1 гарм., Гл	0,95			
Индукция 3 гарм., Гл	0,36			
Индукция 5 гарм., Гл	0,25			
Индукция 7 гарм., Гл	0,10		$AL =$	20
	РАСЧЕТ ЭДС			
	1-я гарм	3-я гарм	5-я гарм	7-я гарм
К-т укорочен, $K_y =$	0,86603	0	-0,866	0,86603
К-т распредел. $K_p =$	0,95984	0,66697	0,21815	-0,1768
Обмоточный к-т $K_o =$	0,83124	0	-0,1889	-0,1531
Полюс. деление, м $T_v =$	0,0942	0,0314	0,01884	-0,01346
Магн. поток, Вб $\Phi =$	0,0057	0,00072	0,0003	$8,6 \cdot 10^{-5}$
Частота, Гц $f =$	50	150	250	350
ЭДС гармоника, В $E_v =$	1,05185	0	-0,0629	-0,0204
ЭДС витка, В $E =$	0,86603	0	-0,866	0,86603
Коэффициент формы, $K_{\phi} =$	18,69		$W_{yt} =$	234
Уточненная ЭДС фазы, В $E =$	221,4892			

3. ОБЩИЕ ПРАВИЛА ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

К выполнению очередной лабораторной работы допускаются студенты, которые к ней подготовлены теоретически и методически. Готовясь к работе, следует уяснить цель и изучить методику выполнения работы; разобраться с принципиальной электрической схемой экспериментальной установки, понять принцип работы, назначение и взаимосвязь элементов схемы; ознакомиться с теоретическими сведениями по выполняемой работе, т.е. понять физическую сущность исследуемых процессов и их аналитические зависимости. Следует вспомнить теоретические сведения по ранее изучавшимся дисциплинам (физика, математика, электротехника, электроника), а по изучаемым дисциплинам прочитать соответствующие разделы в литературных источниках. Необходимо подготовить таблицы для записи экспериментальных данных и, если требуется, выполнить расчеты, предшествующие эксперименту.

Для выполнения лабораторных работ организуются бригады из 3-4 студентов. Перед началом исследования преподаватель проводит краткий опрос студентов, проверяет их готовность, после чего они допускаются к выполнению лабораторной работы. Полученные результаты следует показать преподавателю.

Для получения зачета по лабораторной работе необходимо представить надлежащим образом оформленный отчет и ответить на вопросы преподавателя. При подготовке к отчету следует использовать имеющиеся вопросы для самопроверки.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ И ТРЕБОВАНИЯ К ЕГО ОФОРМЛЕНИЮ

Отчет по лабораторной работе выполняют на листах формата А4 с соблюдением действующих стандартов на оформление текстовых документов, графические и буквенно-цифровые обозначения элементов схем, единиц

физических величин, построение диаграмм и графиков. Электрические схемы вычерчивают карандашом с обязательным применением чертежных инструментов. Возможно оформление материалов на компьютере.

Отчет должен содержать:

- Титульный лист, на котором указывают названия учебного заведения, кафедры, лаборатории, лабораторной работы, фамилию и инициалы студента, специальность, курс, группу и фамилию преподавателя, принимающего отчет;
- Формулировку цели работы;
- Принципиальную электрическую схему экспериментальной установки;
- Технические характеристики измерительных приборов;
- Паспортные данные объектов исследования;
- Расчетные формулы;
- Таблицы с результатами измерений и вычислений;
- Диаграммы (графики);
- Выводы по работе, обобщающие материалы проведенного исследования или указывающие на основные особенности процесса.

5. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ

Лабораторные стенды являются действующими электроустановками, представляющими при обращении с ними определенную опасность, поэтому при работе в лаборатории каждый студент должен строго соблюдать следующие основные правила:

- Разрешается работать только на рабочем месте (стенде), указанном преподавателем;
- Не покидать рабочее место до окончания эксперимента;
- Перед началом сборки схемы необходимо убедиться в том, что вводное устройство отключено и стенд обесточен;
- Включать схему или установку только с разрешения преподавателя или лаборанта;
- Изменения (переключения) в электрических схемах можно производить только при отключенном питании;
- При измерениях переносными приборами не касаться руками оголенных частей установки, находящихся под напряжением. Провода, подключенные к переносным приборам, держать за изолирующие наконечники;
- Пользоваться соединительными проводами с исправной изоляцией. Не использовать провода без штырей и наконечников;
- Обнаружив любую неисправность в работе лабораторного стенда, находящегося под напряжением, необходимо немедленно отключить его от сети и сообщить об этом преподавателю;
- Не прикасаться к движущимся частям машины, не проворачивать роторы машин за валы, муфты, маховики;
- Во всех случаях при возникновении непосредственной опасности для здоровья людей и целостности оборудования следует немедленно

отключить питающую сеть с помощью аварийной кнопки «Стоп» на силовом щите;

- По окончании экспериментального исследования отключить вводное устройство, показать результаты преподавателю и только после этого разобрать схему.

Образец формы отчета

Студент Иванов И.И.

Зк. 4гр.

Лабораторная работа № 1

1. Тема: **«ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ».**

2. Цель работы: на примере конкретной машины изучить конструкцию и принцип действия трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутой обмоткой и с фазным ротором, устройство отдельных узлов машины, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми в асинхронных электродвигателях.

3. Конструктивная схема асинхронных электродвигателей с короткозамкнутой обмоткой и с фазным ротором.

4. Паспорт машины:

- электродвигатель _____ Марка
- номинальная мощность, P_n кВт;
- номинальное напряжение, U_nВ;
- номинальный ток, I_nА;
- номинальная частота вращения, n_nоб/мин;
- коэффициент полезного действия,.....%.

5. Наименование, количество, материал, назначение узлов, деталей.

Наименование, тип узлов, деталей	Кол-во	Материал узла, Детали	Назначение узла, краткое описание
Станина	1	Электротехническая листовая сталь 0,27-0,35 мм	Является конструкционной и механической основой, служит для локализации и усиления магнитного потока

6. Вывод.

Лабораторная работа №1
ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ
ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучить конструкцию и принцип действия трехфазных асинхронных электродвигателей с короткозамкнутой обмоткой и с фазным ротором, устройство отдельных узлов машины, ознакомиться с электротехническими материалами, применяемыми в асинхронных электродвигателях.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Асинхронные машины – это электрические машины переменного тока, у которых магнитное поле (статора) и проводники (обмотки ротора) имеют разные частоты вращения.

Асинхронные машины используют преимущественно в качестве электрических двигателей. Их преимущества – простота, технологичность изготовления, высокая надежность при эксплуатации. В качестве генераторов электрической энергии асинхронные машины не получили распространения из-за сложности их возбуждения и регулирования напряжения. Генераторный режим асинхронных машин используют в основном для их торможения, когда они нормально работают двигателями. Например в крановых механизмах.

Асинхронные двигатели для массового применения выпускают единичными сериями. Единая серия представляет собой ряд асинхронных двигателей возрастающей мощности одноступенчатой конструкции и удовлетворяющих общим техническим требованиям.

Первая единая серия асинхронных двигателей (серия А) была разработана и освоена в производстве в 1951 г. Она охватывала диапазон мощностей от 0,6 до 100 кВт.

В последующие годы были разработаны и освоены следующие серии асинхронных двигателей: А2 и АО2 (1959 г.), 4А и 4АМ (1972 г.), АИР (1981 г.), РА (1992 г.), 5А (1996 г.), 6А, РА.

Основная единая серия асинхронных двигателей 4А включает в себя двигатели мощностью 0,06...400 кВт и содержит в этом диапазоне 32 номинальных значения мощностей. Двигатели мощностью 0,06...0,37 кВт выполняют на напряжения 220 и 380 В, мощностью 0,55...11 кВт – 220, 380 и 660 В. Обмотка статора этих двигателей соединена звездой или треугольником и имеет три выходных конца. Двигатели мощностью 15...110 кВт выполняют на напряжения 200/380 В и 380/660 В; мощностью 132...400 кВт – 380/660 В. обмотка статора содержит 6 выводных концов; схема соединения Δ/Y .

Двигатели предназначены для работы от сети с частотой 50 Гц и их изготавливают на синхронные частоты вращения 500...3000 мин⁻¹. Асинхронные двигатели серии АИР разработаны в рамках Международной организации по экономическому и научно-техническому сотрудничеству в электротехнической промышленности (ИНТЕРЭЛЕКТРО).

Эта серия включает в себя двигатели мощностью 0,025...315 кВт с напряжением питания 220/380 В и 380/660 В и частотой 50 Гц. Синхронные частоты вращения двигателей 500...3000 мин⁻¹. По сравнению с двигателями серии 4А двигатели АИР имеют более высокий КПД, пониженные шумы и вибрации, меньшую материалоемкость. Асинхронные двигатели серии 5А полностью взаимозаменяемы с двигателями серии 4А и АИР.

Рабочий процесс асинхронных двигателей

Принцип действия асинхронных машин основан на явлении электромагнитной индукции и возникновения электромагнитных сил. При подключении обмотки статора к сети трехфазного синусоидального тока возникает вращающееся магнитное поле с синхронной частотой вращения n_1 :

$$n_1 = 60f_1 / p \quad (1)$$

где f_1 – частота питающего напряжения, Гц; p – число пар полюсов магнитного поля.

Вращающееся магнитное поле пересекает проводники ротора и в соответствии с законом электромагнитной индукции индуцирует в них ЭДС E_2 , направление которой по правилу правой руки.

Под действием ЭДС E_2 в короткозамкнутой обмотке ротора будут протекать токи I_2 . На проводники ротора с током I_2 , находящиеся в магнитном поле статора, по закону Ампера будет действовать электромагнитные силы F , направление которых определяют по правилу левой руки. Образованная от сил, приложенных ко всем проводникам, результирующая пара сил создает электромагнитный вращающий момент, увлекающий ротор за вращающимся магнитным полем.

Двигатель асинхронный с короткозамкнутым ротором – вращающаяся электрическая машина переменного тока, принцип работы которой основан на явлении электромагнитной индукции. В асинхронном двигателе электрическая энергия преобразуется в механическую путем подключения обмотки статора к сети переменного тока. При этом частота вращения ротора меньше частоты вращения электромагнитного поля. Обычно асинхронный двигатель называют также асинхронной машиной, преобразующей электрическую энергию переменного тока, поступающего в обмотку статора, в механическую энергию вращающегося ротора.

Рабочий процесс асинхронного двигателя можно условно разделить на 4 стадии:

1 – «возбуждение» и 2 – «подведение первичной энергии» проходят одновременно. На трехфазную обмотку статора подается трехфазный переменный ток. Создается вращающееся электромагнитное поле статора. В короткозамкнутой обмотке ротора под действием вращающегося магнитного поля наводится ЭДС, вызывающая протекание токов в стержнях обмотки ротора двигателя. Эти токи создают собственное магнитное поле.

3 – «преобразование энергии». В результате взаимодействия магнитного поля ротора с магнитным полем статора в соответствии с законом Ленца возникает вращающий момент, стремящийся устранить причину, вызвавшую появление тока в короткозамкнутой обмотке ротора. Работоспособность двигателя поддерживается только в том случае, если частота вращения магнитного поля статора отличается от частоты вращения ротора, поскольку в этом случае обеспечивается взаимное перемещение магнитного поля статора относительно стержней обмотки ротора, а следовательно, и появление в них тока и вращающего момента. По этой причине рассматриваемые двигатели называются асинхронными.

4 – «передача энергии нагрузке». К валу двигателя подключается нагрузка, которая создает тормозной момент. Для преодоления этого тормозного момента двигатель потребляет из сети большой ток и восстанавливает частоту вращения.

Частота вращения ротора асинхронного двигателя прямо пропорциональна частоте напряжения питания, обратно пропорциональна числу пар полюсов обмотки статора и определяется из выражения

$$n = \frac{(1-s)60f}{2p}.$$

где S – скольжение.

Ротор приходит во вращение, и его установившаяся частота вращения n_2 будет определяться из условия равновесия электромагнитного момента M и тормозного момента, создаваемого силами трения, и приводимым во вращение рабочим механизмом.

Частота вращения ротора n_2 принципиально всегда меньше частоты вращения магнитного поля n_1 . Разность частот вращения магнитного поля и ротора, выражается в долях или процентах от частоты вращения магнитного поля, называют скольжением S :

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} ; \quad S \% = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100\%$$

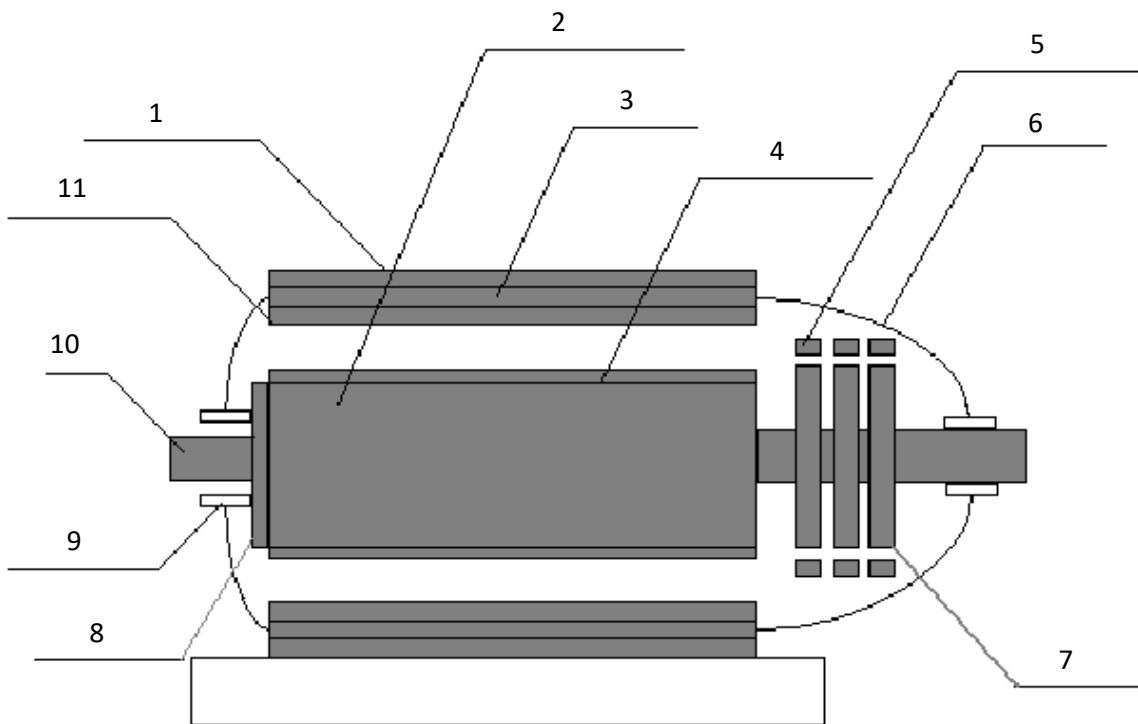


Рисунок 6 - Конструкция асинхронного двигателя: 1-станина; 2-сердечник ротора; 3 - сердечник статора; 4 – обмотка ротора; 5 – щеточный аппарат; 6 – подшипниковые щиты; 7 – контактные кольца; 8 – крыльчатка вентилятора; 9 – подшипники; 10 – вал; 11- обмотка статора.

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из **станины**, неподвижного **статора** и размещенного внутри его вращающегося **ротора** (рис. 6). Их поверхности разделены равномерным воздушным зазором $0,2 \dots 1,5$ мм.

Станина предназначена для крепления всех основных узлов машины. Станины машин переменного тока в основном изготавливают чугунными литыми; при этом обеспечивается высокая надежность машин благодаря достаточной механической прочности и коррозионной стойкости чугуна, а также стабильности размеров при сборочных операциях. Наряду с чугунными применяют также станины из алюминиевых сплавов, образуемые обливкой сердечника статора в машинах для литья под давлением.

Для размещения коробки выводов в станине предусматривают прилитые или приваренные фланцевые основания с окнами для выводных проводов обмотки. Для обеспечения требований по технике безопасности на станине

размещают наружные зажимы для заземления корпуса машины. На станине в верхней части предусмотрены рым-болты или транспортные ушки, предназначенные для подъема машины. К станине на видном месте крепят табличку из некоррозионных материалов с техническими данными машины.

Статор синхронной машины состоит из **сердечника** и **обмотки** и впрессовывается в станину. Сердечник в виде полого цилиндра собирают из отдельных листов электротехнической стали толщиной 0,35...0,5 мм, которые скрепляют скобами, шпильками или сварным швом. Листы имеют кольцевую форму с пазами по окружности внутреннего диаметра, что позволяет создать на внутренней поверхности сердечника при его сборке продольные пазы, в которые затем укладывают обмотку. Магнитопровод асинхронного двигателя набирают из листовой электротехнической стали марки 2214. Таким образом, сердечник статора служит для проведения и усиления магнитного потока.

Обмотка статора предназначена для создания вращающегося магнитного поля и укладывается в пазы сердечника статора. Обмотки статоров с высотой оси вращения 56...250 мм выполняют из круглого провода; с высотой осивращения 280..355 мм – из жестких катушечных групп. Марки обмоточного провода ПЭТ-155 (ПЭТМ-155) – провод обмоточный, изолированный теплостойкой эмалью на основе полиэфиримидов (М – для механизированной укладки). Для изготовления станины и подшипниковых щитов используют алюминий и его сплавы, сталь, чугун.

Ротор асинхронных двигателей бывают двух видов: с короткозамкнутой и фазной обмотками. В зависимости то этого и сами асинхронные двигатели называют двигателями с короткозамкнутым и фазным ротором.

Сердечник ротора выполняют из неизолированных листов электротехнической стали. В них выштамповываются пазы для обмотки и отверстия для вала. В фазных роторах в пазы укладывают **обмотку**, аналогичную статорной обмотке и образующую такое же число полюсов. Концы этой обмотки обычно соединяют в звезду, а начала выводят на три медных контактных кольца, на которые накладывают щетки. При таком

исполнении ротора можно через щеточные контакты включать в цепь ротора трехфазный реостат для изменения силы тока и момента двигателя при пуске или для регулирования частоты вращения. Наиболее распространены короткозамкнутые роторы. В таком роторе обмотка выполнена в виде так называемой «беличьей клетки». Ее выполняют путем заливки под давлением в пазы алюминия А5 или алюминиевых сплавов АКМ12-4. При этом одновременно отливают стержни (проводники), лежащие в пазах, короткозамыкающие их кольца и лопасти для вентиляции.

Контактные кольца применяют в асинхронных двигателях с фазным ротором. Контактные кольца располагают на валу, обычно за подшипниковым щитом, и заключают их в коробку. Контактные кольца медные или латунные у машин мощностью до 100 кВт и стальные или чугунные в машинах большей мощности. Наружный диаметр контактных колец принимают меньше наружного диаметра подшипника качения для того, чтобы коробка контактных колец и подшипниковый щит машины могли быть при разборке сняты без предварительного съема контактных колец с вала.

На корпусе двигателя прикреплена табличка, на которой приведены номинальные данные двигателя, в том числе указаны схема соединения обмоток статора и соответствующее ей номинальное напряжение питающей сети, например схема Δ/Y , номинальное напряжение 220/380 В.

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изучить теоретические положения методического указания к лабораторной работе.
2. Составить конструктивную схему изучаемого образца асинхронного электродвигателя и указать позиционные обозначения основных узлов машины.
3. Записать паспортные данные образца АД.
4. Разобрать электродвигатель.
5. Определить количество, применяемые материалы и назначение отдельных узлов машины. Данные внести в таблицу.

6. Собрать электродвигатель и сдать рабочее место лаборанту.
7. Составить отчет и сдать преподавателю.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Произвести внешний осмотр электродвигателя: определить тип электродвигателя (с короткозамкнутым или фазным ротором) и наметить порядок разборки.
2. Открыть клеммную коробку на двигателе и определить схему соединения обмоток статора.
3. Составить конструктивную схему машины и расписать соответствующие позиционные обозначения.
4. Изучить и записать в рабочую тетрадь паспортные данные электродвигателя.
5. Разобрать электродвигатель, осмотреть взаимное расположение основных узлов и определить их назначение и материалы, применяемые при их изготовлении.
6. Определить способ охлаждения внутренних и наружных частей электродвигателя.
7. Осмотреть подшипниковые щиты, определить, где передний, а где задний щит. Описать их назначение.
8. Для двигателей с фазным ротором изучить назначение и применяемые материалы для щеточного аппарата и контактных колец.
9. Составить отчет и сдать преподавателю.
10. Собрать электродвигатель и сдать инструмент лаборанту.
11. Сделать выводы по проделанной работе. В выводе отразить основные конструктивные отличия, преимущества и недостатки двигателей с короткозамкнутым ротором по сравнению с двигателями с фазным ротором.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Какие машины называются асинхронными?
2. Объяснить область применения асинхронных машин.
3. Объяснить рабочий процесс асинхронного электродвигателя на основе законов электромагнитной индукции и закона Ампера.
4. Объяснить, почему частота вращения ротора меньше частоты вращения магнитного поля статора.
5. Объяснить понятие и привести аналитическое выражение скольжения.
6. Объяснить назначение, устройство и применяемые материалы статора асинхронного электродвигателя.
7. Описать назначение, конструктивное исполнение и применяемые материалы в двигателях с короткозамкнутым ротором.
8. Описать назначение, конструктивное исполнение и применяемые материалы в двигателях с фазным ротором.
9. Объяснить понятие “единая серия” и описать существующие единые серии асинхронных электродвигателей.

Лабораторная работа № 2

ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получить практические навыки расчета параметров, составления схем и технологии укладки однослойных концентрических обмоток.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Обмотка является важнейшей частью электрической машины. У асинхронных двигателей имеются 2 обмотки – статора и ротора. В данной работе рассматриваются только обмотки статора.

Достоинством однослойных обмоток является:

- простота изготовления;
- более высокий коэффициент заполнения паза медью (по сравнению с двухслойными);
- меньший расход материала.

Недостатком этих обмоток является то, что кривые магнитодвижущих сил содержат большой спектр высших гармоник, наибольшие по амплитуде из которых пятая и седьмая, что отрицательно сказывается на пусковых характеристиках двигателя. Недостатком концентрических обмоток является необходимость изготовления катушек различным шагом на различных шаблонах.

Обмотка статора предназначена для создания в воздушном зазоре статора вращающегося магнитного потока. Рабочий процесс асинхронного электродвигателя основан на взаимодействии вращающегося магнитного потока статора с ротором.

Двухфазное вращающееся магнитное поле.

Условия создания вращающегося магнитного поля для двухфазной системы токов

1. Условия, которым должны отвечать токи(напряжения):

а) токи в фазах должны изменяться во времени по синусоидальному закону;

б) сдвиг фаз токов во времени должен составлять 90 эл.гр.

2. Условия, которым должны отвечать обмотки:

а) обмотки различных фаз должны располагаться в пространстве по окружности;

б) начала соседних фаз обмоток должны быть смещены в пространстве на 90 эл.гр.

в) геометрические размеры и число витков обмоток разных фаз должны быть одинаковыми.

Элементы обмотки статора.

Обмоткой статора называется система изолированных проводников в определенном порядке уложенных в пазы статора и определенным образом соединенных между собой в электрическую цепь. Основными элементами обмотки являются:

- *проводник* – отрезок изолированного провода, расположенный в магнитном поле машины;

- *виток* – два проводника, соединенных последовательно и расположенных под разноименными полюсами машины;

- *секция(катушка)* – один или несколько витков, соединенных между собой последовательно. Секция состоит из двух активных сторон и двух лобовых частей. Активные стороны – это те части секций, которые лежат в пазах статора. Лобовые части соединяют между собой активные стороны секций, и они выходят за пределы статора;

- *катушечная группа* – это одна или несколько секций, соединенных последовательно (или параллельно) и занимающая на статоре две фазные зоны;

- *фазная зона* – участок статора, на котором расположены стороны секций обмотки катушечной группы одной фазы одного полюса;

- *фаза обмотки* – одна или несколько катушечных групп, соединенных последовательно или параллельно и участвующих в создании магнитного потока одной фазы.

Классификация обмоток.

По конструктивному исполнению: катушечные и стержневые.

Катушечные обмотки изготавливаются из провода круглого сечения диаметром до 3 мм в виде многовитковых катушек. Катушки получаются мягкими, они укладываются в пазы статора путем проталкивания (всыпания) по одному проводнику в паз.

Стержневые обмотки выполняются из медных стержней прямоугольного сечения размера сторон до 30 мм.

По числу слоев в пазу: однослойные и многослойные.

Однослойной обмоткой называется такая обмотка, у которой в пазу располагается одна активная сторона секции.

Многослойной обмоткой называется такая обмотка, у которой в одном пазу статора располагается две и более активных стороны секции.

По технологии укладки: насыпные и впротяжку.

По типу катушек однослойные обмотки делятся:

- концентрические (каждая последующая секция входит внутрь предыдущей);

- шаблонные (секции одинаковых размеров, выполненные в форме трапеции; одна активная сторона секции больше второй);

- цепные.

Концентрические обмотки в свою очередь на:

- двухплоскостные;

- трехплоскостные;

- «вразвалку».

Шаблонные делятся на:

- простые шаблонные;

- цепные шаблонные;

- «вразвалку».

Общие требования, предъявляемые к обмоткам машин переменного тока:

1. Обмотка должна обеспечивать заданные значения магнитного потока и ЭДС при минимальном расходе проводникового материала.

2. Обмотка должна обладать достаточной электрической, механической и термической прочностью, необходимой для обеспечения срока службы электродвигателя не менее 20 лет.

3. Обмотка должна быть технологична в изготовлении и легко поддаваться ремонту.

4. Обмотка должна обеспечивать форму индуктируемых ЭДС и НС., близкой к синусоидальной.

Параметры однослойных обмоток:

1. Полусное деление – τ . Это число пазов статора, приходящихся на один полюс:

$$\tau = \frac{Z}{2p} \quad [\text{пазов}].$$

2. Число пазов на полюс и фазу – q

$$\tau = \frac{Z}{2pm}$$

где m – число фаз.

3. Шаг обмотки – y . Это расстояние в пазах между первой и второй активными сторонами одной секции.

$$y_n = 2(q + N) - 1$$

где N – номер секции в катушечной группе.

Так как секции концентрической обмотки имеют различные размеры, то и шагов будет несколько. Количество секций в катушечной группе равно – q , следовательно и число частичных шагов равно - q

4. Угол сдвига ЭДС между соседними пазами статора в электрических градусах – α

$$\alpha = \frac{360p}{z}$$

Правила составления схемы однослойной обмотки

1) Число катушечных групп в каждой фазе n равно числу пар полюсов p :

$$n = p.$$

2) Начала соседних катушечных групп одной фазы смещены на 360 электрических градусов или на 2 полюсных деления.

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

4) Начала обмоток соседних фаз смещены на 120 электрических градусов.

5) Катушечные группы одной фазы соединяются по схеме: конец предыдущей секции соединяются с началом последующей.

Методика укладки однослойной двухплоскостной обмотке на статоре

В соответствии с правилами составления схем обмоток число катушечных групп в каждой фазе равно – p , соответственно во всей обмотке – $3p$. Причем половина катушечных групп в каждой фазе (а следовательно и во всей обмотке) будет иметь малые размеры, а половина – большие.

В свою очередь, каждая катушечная группа и большого, и малого размера состоит из нескольких секций, концентрически входящих друг в друга.

1. Перед укладкой обмотки следует отобрать необходимое количество катушечных групп каждого размера;

2. Затем определить начало и конец каждой катушечной группы. При этом нужно строго следить за тем, чтобы направление намотки всех секций было неизменным.

3. Промаркировать пазы статора, выбрав первый паз произвольно.

4. Укладку обмотки следует начинать с укладки всех катушечных групп “малого” размера.

5. Затем укладываются катушечные группы “большого” размера. Лобовые части секций отгибаются к спинке статора. Они не должны попадать в расточку статора.

6. Производится соединение катушечных групп одной фазы в соответствии со схемой-таблицей. Начала и концы фаз маркируются бирками.

7. По заданию руководителя, обмотки фаз соединяются по схеме “звезда” или “треугольник”.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Получить исходные данные для расчета обмотки;
2. Рассчитать параметры обмотки;
3. Составить схему-таблицу обмотки, используя правила составления схемы;
4. составить схему-развертку трехфазной обмотки;
5. на схеме-развертке указать направление токов в пазах и обозначить магнитные полюса;
6. уложить обмотку на статоре;
7. оформить отчет и сдать руководителю занятия.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Пример выполнения и оформления отчета по лабораторной работе

Исходные данные:

число пазов $z = 12$;

число полюсов $2p = 4$;

число фаз $m = 3$;

тип обмотки – однослойная концентрическая.

По исходным данным требуется:

- рассчитать параметры обмотки;
- составить схему-таблицу;
- вычертить схему-развертку, указать на ней направления токов в пазах и обозначить магнитные полюса;
- вычертить звезду пазовых ЭДС;
- уложить обмотку на статоре.

Расчет параметров обмотки:

1. Полусное деление: $T = \frac{z}{2p} = \frac{12}{4} = 3$ паз
2. Число пазов на полюс и фазу: $T = \frac{z}{2pt} = \frac{12}{12} = 1$ паз
3. Шаг обмотки: $y = 2(q + N) - 1 = 2 \times (1 + 1) - 1 = 3$ паз
4. Угол сдвига пазовых ЭДС:

$$a = \frac{360p}{z} = \frac{360 \times 2}{12} = 60 \text{ эл. гр.}$$

Составление схемы-таблицы обмотки

В соответствии с правилами составления схем обмоток получаем следующую схему-таблицу:

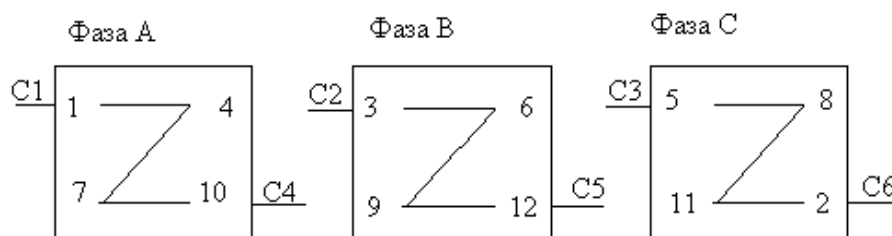


Рисунок 7 - Схема-таблица однослойной концентрической обмотки

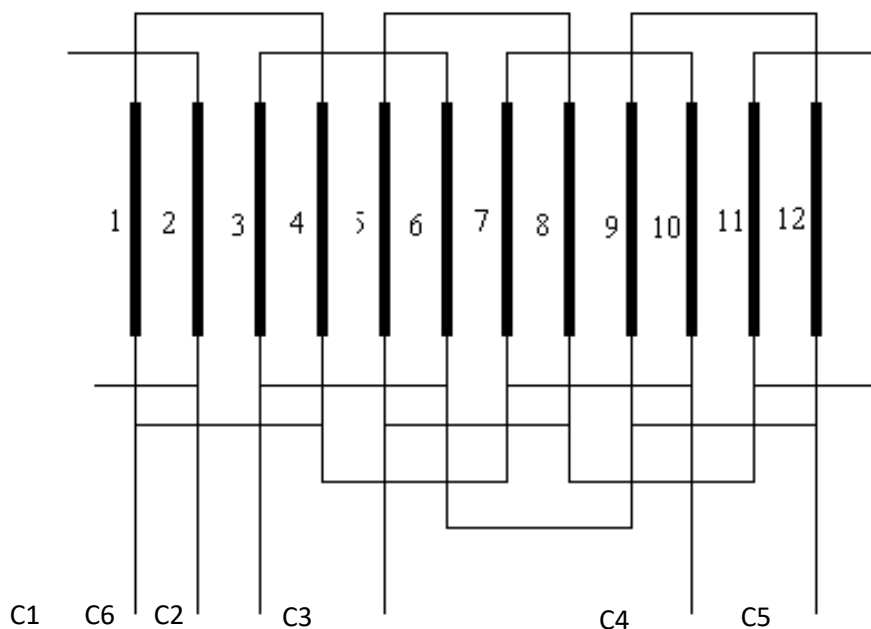


Рисунок 8 - Схема – развертка однослойной концентрической обмотки

В соответствии со схемой – таблицей вычерчиваем развернутую схему обмотки. Указываем на ней направления токов в фазах. При этом в 2-х фазах ток следует направлять от начала фазы к концу, а в третьей – от конца к началу. Группа пазов, имеющих одинаковое направление тока, образуют магнитный полюс. Можно условно принять, что направление тока “вверх” соответствуют северному полюсу, а “вниз” – южному.

Сделать выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Описать условия создания вращающегося магнитного потока в двухфазной обмотке.
2. Перечислить общие требования к обмоткам машин переменного тока.
3. Дать классификацию обмоток по всем признакам.
4. Описать преимущества и недостатки однослойных обмоток.
5. Дать определения всех элементов обмотки (проводник, виток, секция, катушечная группа, фазная зона, фаза).
6. Описать параметры однослойной обмотки.
7. Описать правила построения однослойных концентрических обмоток.
8. Объяснить методику укладки однослойной двухплоскостной обмотки на статоре.

Лабораторная работа №3

ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Получить практические навыки расчета параметров, составления схем и технологии укладки двухслойных концентрических обмоток.

ОСНОВНЫЕ ПОНЯТИЯ

Обмотки статоров двигателей с высотой оси вращения 56...250 мм выполняются всыпными из круглого провода; с высотой оси вращения 280...355 мм – из жестких катушечных групп (из провода прямоугольного сечения). Марка обмоточного провода ПЭТ – 155 (табл. 1).

Таблица 1 - Марка обмоточного провода ПЭТ – 155

Наименование	Примечание
ПЭТ-155 (ПЭТМ-155) – провод обмоточный, изолированный теплостойкой эмалью на основе полиэфиримидов (М – для механизированной укладки)	Обмоточный провод
ПСК (ПСК-М) – пленкосинтокартон	Пазовая изоляция
Аривсан – полиэтилентерефталатная пленка, оклеенная с двух сторон полиарелатной пленкой	То же
КП – 50, КП – 34 – смесь полиэфиров, отвержденных пастой перекиси бензолина	Пропиточные компаунды
ТКСП – трубки изоляционные (кремнийорганическая резина в оплетке из стеклошнур-чулка)	Выводные провода и изоляционные трубки
ПВКФ – провод выводной с изоляцией из кремнийорганической резины во фторсилоксиновой оболочке	То же
РКГМ – провод выводной с изоляцией из кремнийорганической резины в оплетке из стекловолокна	То же
Сталь 2214 холоднокатаная электротехническая	Сталь магнитопровода

Катушки после укладки в пазы сердечников закрепляют пазовыми клиньями из стеклотекстолита и пропитывают компаундом. Лобовые части катушечных групп бандажируют изоляционным чулком из стекловолокна и покрывают лаком.

Основное внимание при проектировании двигателей серии АИ было уделено повышению их надежности, которая достигнута за счет применения материалов класса нагревостойкости F при допустимом перегреве обмоток, соответствующем классу нагревостойкости В.

Класс нагревостойкости изоляционных материалов в соответствии с ГОСТ 8865 определяется максимальной допустимой температурой. Предельно-допустимое превышение температуры обмотки получается путем вычитания из температурного индекса изоляции (табл.2) номинальной температуры окружающей среды, значение которой для умеренного климата принято 40 °С.

Таблица 2 - Нагревостойкость изоляционных материалов

Класс нагревостойкости изоляции	Температурный индекс материала, °С	Максимальное превышение температуры наиболее нагретой точки обмотки, °С	Максимально допустимое превышение температуры обмотки, измеренное по методу сопротивления, °С
Е	120	80	75
В	130	90	80
F	155	115	100
Н	180	140	125

Трехфазное вращающееся магнитное поле.

Условия создания вращающегося магнитного поля для трехфазной системы токов

1. Условия, которым должны отвечать токи(напряжения):

а) токи в фазах должны изменяться во времени по синусоидальному закону;

б) сдвиг фаз токов во времени должен составлять 120 эл.гр.

2. Условия, которым должны отвечать обмотки:

а) обмотки различных фаз должны располагаться в пространстве по окружности;

б) начала соседних фаз обмоток должны быть смещены в пространстве на 120 эл.гр.

в) геометрические размеры и число витков обмоток разных фаз должны быть одинаковыми.

Параметры двухслойных обмоток

1. Полусное деление – τ . Это число пазов статора, приходящихся на один полюс:

$$\tau = \frac{z}{2p} [\text{пазов}]$$

2. Число пазов на полюс и фазу – q :

$$q = \frac{z}{2pt}$$

где t – число фаз.

3. Шаг обмотки – y . Это расстояние в пазах между первой и второй активными сторонами одной секции:

$$y = \beta \frac{z}{2p}$$

4. Угол сдвига э.д.с. между соседними пазами статора в электрических градусах – α :

$$\alpha = \frac{360p}{z}$$

Правила составления схемы двухслойной обмотки

1. Число катушечных групп в каждой фазе n равно числу полюсов $p : n = 2p$.
2. Начала соседних катушечных групп одной фазы смещены на 180 электрических градусов или на 1 полюсное деление.
3. Число секций в каждой катушечной группе s равно числу пазов на полюс и фазу $q : s = q$.
4. Начала обмоток соседних фаз смещены на 120 электрических градусов.
5. Катушечные группы одной фазы соединяются по схеме: конец предыдущей секции соединяется с концом последующей, начало предыдущей секции соединяется с началом последующей.

Методика укладки двухслойной обмотки статора

Перед укладкой обмотки следует отобрать необходимое количество катушечных групп, промаркировать концы и начала катушечных групп и проверить направление намотки секций. Оно должно быть одинаковым у всех секций.

Укладку обмотки следует начинать с нижних слоев секций. В нашем примере первой укладывается нижняя активная сторона первой секции с номером 6'. Затем укладываются стороны секций с номерами 7', 8', 9', 10', 11', 12'.. Активные стороны секции 1, 2, 3, 4, 5, которые должны лежать в верхнем слое, укладываются в пазы в последнюю очередь после укладки в эти пазы нижнего слоя. Начиная с 6-го паза можно укладывать и первую и вторую активные стороны секций, они автоматически будут ложиться на свое место в верхнем и нижнем слоях.

Завершая укладку обмотки, необходимо уложить нижние активные стороны секций 1', 2', 3', 4', 5', а затем на них уложить верхний слой – секции 1, 2, 3, 4, 5.

По окончании укладки соединить катушечные группы одной фазы в соответствии со схемой-таблицей.

По заданию руководителя соединить фазные обмотки по схеме “звезда” или “треугольник”.

МЕТОДИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Получить исходные данные для расчета обмотки.
2. Рассчитать параметры обмотки.
3. Составить схему-таблицу обмотки, используя правила составления схемы.
4. Составить схему-развертку трехфазной обмотки.
5. На схеме-развертке указать направление токов в пазах и обозначить магнитные полюса.
6. Уложить обмотку на статоре.
7. Оформить отчет и сдать руководителю занятия.

ОБРАБОТКА ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ

Пример выполнения лабораторной работы

Исходные данные:

Числа пазов $z = 12$;

Число полюсов $2p = 2$;

Число фаз $m = 3$;

Коэффициент укорочения $\beta = 0,8$;

Тип обмотки – двухслойная с укороченным шагом.

По исходным данным требуется:

- рассчитать параметры обмотки;
- составить схему-таблицу;
- вычертить схему-развертку, указать на ней направления токов в пазах и обозначить магнитные полюса;
- уложить обмотку на статоре.

Расчет параметров обмотки

1. Полусное деление:

$$\tau = \frac{z}{2p} = \frac{12}{2} = 6 \text{ пазов}$$

2. Число пазов на полюс и фазу:

$$q = \frac{z}{2pm} = \frac{12}{6} = 2 \text{ паза}$$

3. Шаг обмотки:

$$y = \beta \times \tau = 0,8 \times 6 = 5 \text{ пазов}$$

4. Угол сдвига пазовых ЭДС:

$$a = \frac{360 \times p}{z} = \frac{360 \times 1}{12} = 60 \text{ эл. гр.}$$

Составление схемы-таблицы обмотки

В соответствии с правилами составления схем обмоток получаем следующую схему-таблицу. При этом стороны секций, укладываемых в верхний слой обозначаем цифрой без индекса, а стороны секций, укладываемых в нижний слой цифрой с индексом:

Вычертить схему-развертку.

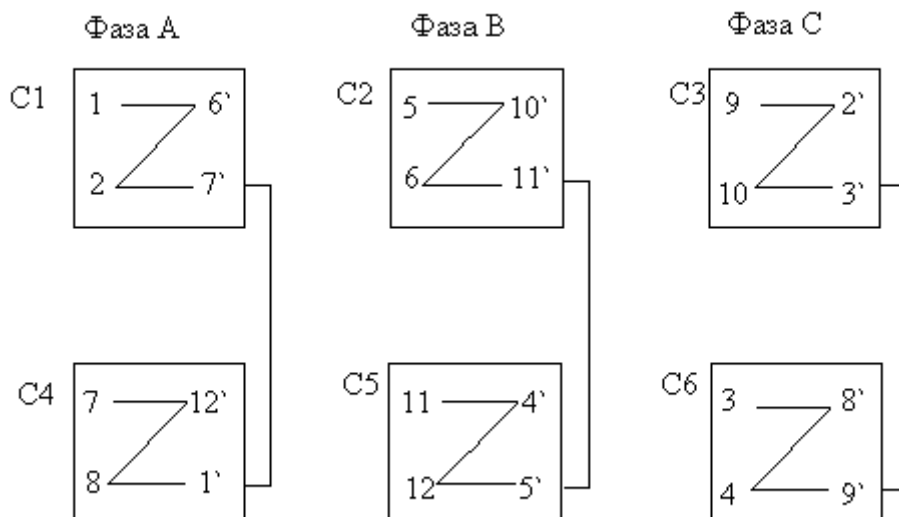


Рисунок 9 - Схема-таблица двухслойной обмотки

При вычерчивании схемы-развертки следует учитывать следующие рекомендации.

Стороны секций, лежащих в верхнем слое, изображаются сплошной линией, расположенной слева от условного изображения паза и нумеруются цифрой без индекса. А стороны секций, лежащих в нижнем слое, изображаются штриховой линией справа от линии условного изображения паза и нумеруются цифрой с индексом.

Указываем направления токов в фазах. При этом в 2-х фазах ток следует направлять от начала фазы к концу, а в третьей – от конца к началу. Группа пазов, имеющих одинаковое направление тока, образуют магнитный полюс. Можно условно принять, что направление тока “вверх” соответствуют северному полюсу, а “вниз” – южному.

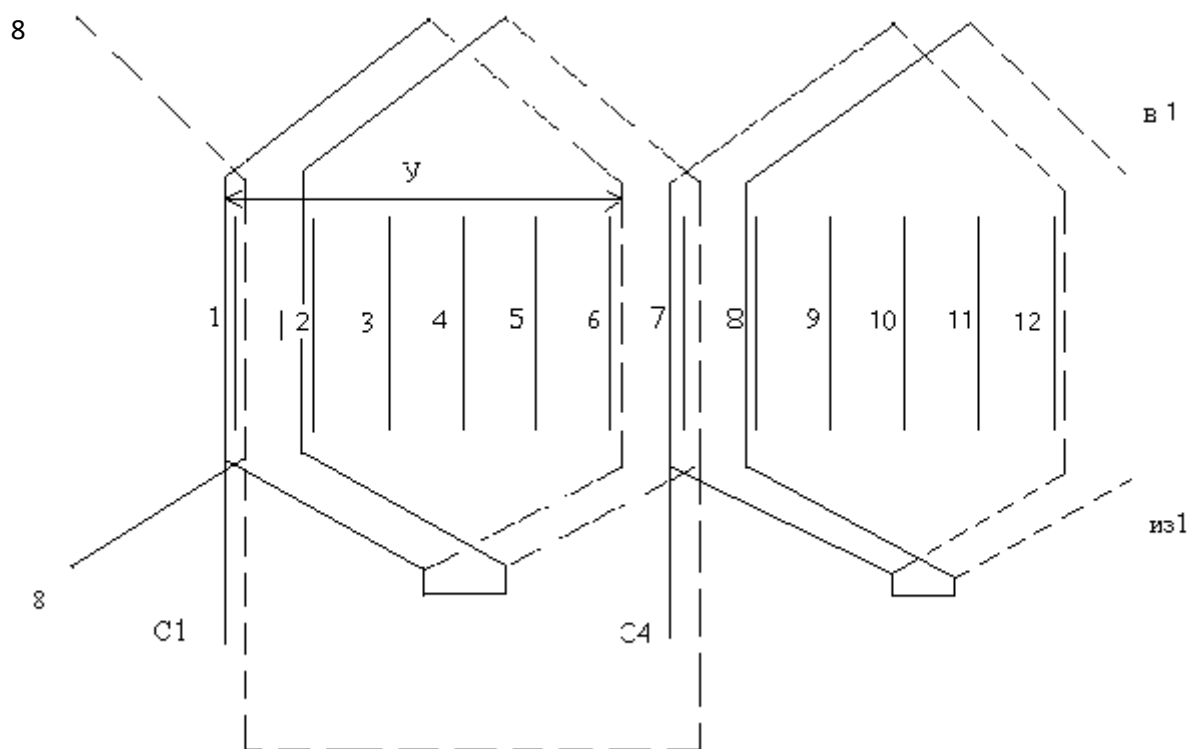


Рисунок 10 - Схема-развёртка двухслойной обмотки

Секции и катушечные группы двухслойных обмоток имеют одинаковые размеры. Количество катушечных групп в 1-й фазе равно – $2p$, а во всей обмотке – $3 \cdot 2p$. В состав каждой катушечной группы входит q секций.

Сделать выводы по работе.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Описать условия создания вращающегося магнитного потока в трехфазной обмотке.
2. Перечислить общие требования к обмоткам машин переменного тока.
3. Дать классификацию обмоток по всем признакам.
4. Описать преимущества и недостатки двухслойных обмоток.
5. Дать определения всех элементов обмотки (проводник, виток, секция, катушечная группа, фазная зона, фаза).
6. Описать параметры двухслойной обмотки.
7. Описать правила построения двухслойных обмоток.
8. Объяснить методику укладки двухслойной обмотки на статоре.

Лабораторная работа №4
ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С
КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование рабочих свойств асинхронного двигателя путем снятия соответствующих опытных характеристик.

ТЕХНИКА ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Изучить схемы для исследования асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Исследовать двигатель в режиме короткого замыкания.
3. Исследовать двигатель в режиме холостого хода.
4. Снять рабочие характеристики двигателя по методу непосредственной нагрузки.
5. Снять рабочие характеристики при изменении частоты.
6. По опытам холостого хода и короткого замыкания рассчитать параметры двигателя, построить схему замещения.
7. Провести обработку экспериментальных данных, составить отчет и сделать заключение по работе.

Пояснения к работе

В лабораторной работе используются следующие модули:

- модуль питания стенда (МПС);
- модуль питания (МП);
- модуль автотрансформатора (ЛАТР);
- силовой модуль (СМ);
- преобразователь частоты (ПЧ);
- модуль измерителя мощности (МИМ);

- модуль добавочных сопротивлений №1 (МДС1);
- модуль добавочных сопротивлений №2 (МДС2);
- модуль ввода/вывода (МВВ).

Перед проведением лабораторной работы необходимо привести модули в исходное состояние:

- переключатель SA1 МДС1 установить в положение «∞»;
- переключатель SA1 МДС2 установить в положение «∞».

-переключатель SA1 модуля ЛАТР установить в нижнее положение, ручку автотрансформатора установить в крайнее левое положение;

Исследуемый асинхронный двигатель входит в состав электромашинного агрегата, включающего в себя собственно исследуемый двигатель М1, нагрузочный генератор - машину постоянного тока - М2. Для проведения работы на персональном компьютере должно быть загружено ПО Labdrive и выбрана соответствующая работа

Схема для исследования асинхронного электродвигателя представлена на рисунке 11.

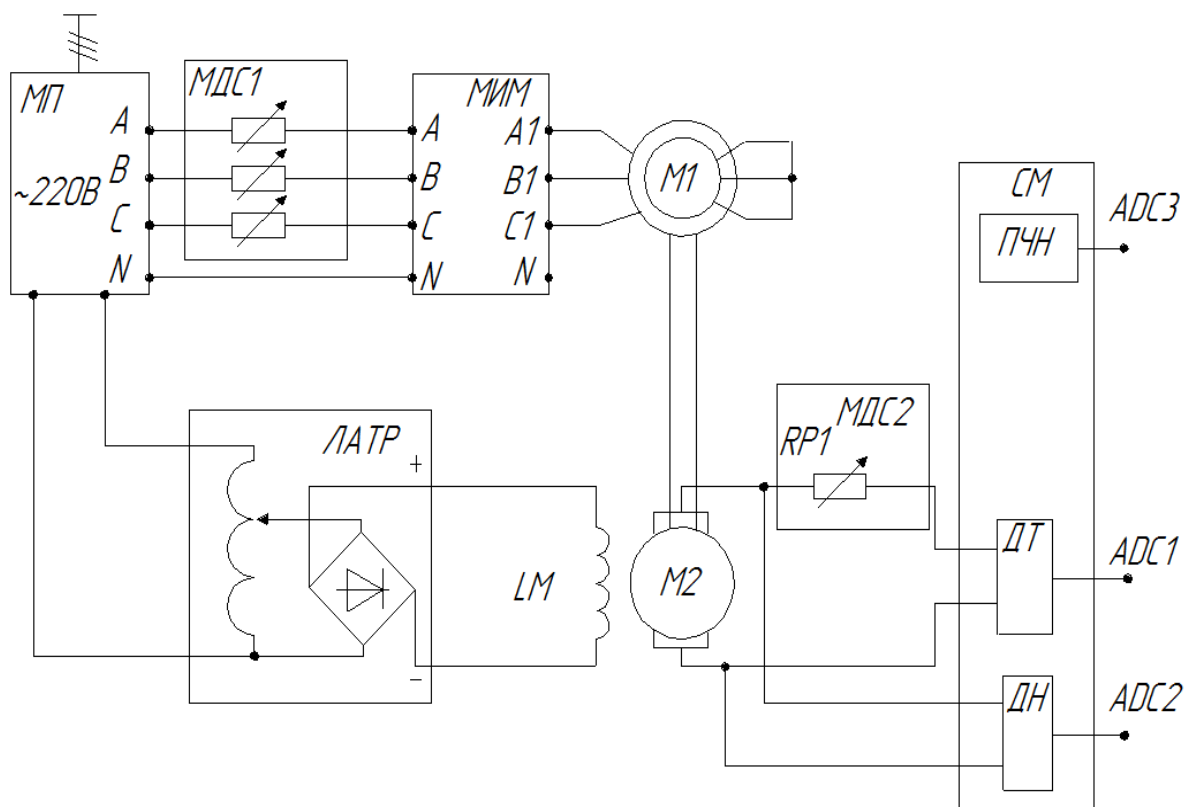


Рисунок 11 - Схема для исследования асинхронного электродвигателя

Опыт короткого замыкания асинхронного двигателя

Опыт короткого замыкания проводится при неподвижном (заторможенном роторе) $S=1$ и пониженном напряжении, при котором ток статора примерно равен номинальному току статора $I_{IK} \approx I_{In}$

Торможение двигателя осуществляется путем установки металлического стержня в отверстие полумуфты.

Понижение напряжения достигается включением добавочного сопротивления в цепь статора.

Ток статора, напряжение статора и мощность двигателя измеряются модулем МИМ.

Опыт проводится в следующей последовательности:

-включить автоматические выключатели QF1 и QF2 соответственно модулей МПС и МП;

-переключателем SA1 МДС1 вводить сопротивление в цепь статора до тех пор, пока ток статора примерно будет равен номинальному току статора. Это точку I необходимо зафиксировать в таблице 3.

Данные занести в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты опыта короткого замыкания

Данные опыта				Расчётные данные						
$U_{1фк}$	$I_{1фк}$	$P_{1фк}$	$\cos\varphi_{1к}$	$P_{1к}$	$\Delta P_{ЭЛЛ}$	$\Delta P_{ст}$	$P_{эмк}$	$M_{эмк}$	$M_{П}^*$	$I_{П}^*$
В	А	Вт		Вт	Вт	Вт	Вт	Нм		

После проведения опыта установить все переключатели модулей в исходное состояние.

Удалить металлический стержень из электромашинного агрегата.

По данным опыта короткого замыкания определить пусковой ток, пусковой момент при $S=1$.

Электромагнитный момент при опыте короткого замыкания, Н*м:

$$M_{эмк} = \frac{P_{эмк}}{\omega_1}, \text{ или } M_{эмк} = \frac{P_{эмк}}{2\pi n_1 / 60}$$

где $P_{эмк}$ - электромагнитная мощность при опыте короткого замыкания, Вт:

$$P_{эмк} = P_{1к} - \Delta P_{ЭЛЛ} - \Delta P_{ст}$$

где $P_{1к}$ -трехфазная активная мощность при опыте короткого замыкания, Вт:

$$P_{1к} = m_1 P_{1фк}$$

где m_1 - число фаз асинхронного электродвигателя.

Электрические потери в обмотке статора асинхронного двигателя, Вт:

$$\Delta P_{ЭЛЛ} = m_1 I_{1к}^2 r_1$$

где r_1 - активное сопротивление фазы статора при температуре окружающей среды (Приложение Б);

Потери в стали при напряжении U_{1K} , Вт:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm1} \left(\frac{U_{1K}}{U_{1H}} \right)^2$$

где ΔP_{cm1} - потери в стали при номинальном напряжении, Вт:

$$\Delta P_{cm1} = P_{10} - m_1 I_{1K}^2 r_1 - \Delta P_{MEХ.АД} - \Delta P_{MEХ.МПТ}$$

где $\Delta P_{MEХ.АД}$ - механические потери асинхронного двигателя (Приложение Б);

$P_{MEХ.МПТ}$ - механические потери машины постоянного тока (Приложение Б).

Электромагнитный момент при номинальном напряжении, Н*м:

$$M_{эмH} = M_{эмK} \left(\frac{U_{1K}}{U_{1H}} \right)^2$$

Кратность пускового момента:

$$M_{п}^* = \frac{M_{эн.д}}{M_H}; \quad M_{п} = \frac{P_{2H}}{\omega_H}$$

где P_{2H} и ω_H — номинальная мощность на валу и угловая номинальная частота вращения (Приложение Б).

Кратность пускового тока:

$$I_{п}^* = \left(\frac{I_{1K}}{I_{1H}} \right) \left(\frac{U_{1H}}{U_{1K}} \right)$$

Опыт холостого хода асинхронного двигателя

Исследование двигателя в режиме холостого хода проводится для одного значения напряжения, равного номинальному, и позволяет оценить величину тока холостого хода, а также потери в стали при номинальном напряжении.

Ток статора, напряжение статора и мощность двигателя измеряется модулем МИМ.

Опыт проводится в следующей последовательности:

-включить автоматические выключатели QF1 и QF2 соответственно модулей МПС и МП;

-переключатель SA1 МДС1 установить из положения «∞» в положение «0», напряжение принимает значение, равное номинальному, запускается асинхронный двигатель.

Данные опыта занести в таблицу 4.

Таблица 4 – Результаты опыта холостого хода

Данные опыта				Расчётные данные				
U	I	P	ω	$\cos\varphi_{10}$	ΔP_{CT}	ΔP_{CTI}	P_{10}	I_{10}^*
В	А	Вт	рад/с		Вт	Вт	Вт	

После проведения опыта установить все переключатели модулей в исходное состояние.

Коэффициент мощности $\cos\varphi_{10}$:

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{m_1 U_{1\Phi} I_{1H}}$$

где P_{10} — активная мощность трех фаз, Вт:

$$P_{10} = m_1 P_{1\phi}$$

m_1 - число фаз асинхронного электродвигателя.

Потери в стали сердечника статора при напряжении $U_{1\Phi}$, Вт

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm1} \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \right)^2$$

где ΔP_{cm1} - потери в стали сердечника статора при номинальном напряжении; Вт

$$\Delta P_{CT1} = P_{10} - m_1 I_{10}^2 r_1 - \Delta P_{MEХ.АД} - \Delta P_{MEХ.МПТ}$$

где r_1 - активное сопротивление фазы статора при температуре окружающей среды (Приложение А); $\Delta P_{MEХ.АД}$ — механические потери асинхронного двигателя (Приложение Б); $\Delta P_{MEХ.МПТ}$ — механические потери машины

постоянного тока (Приложение Б). Значение тока холостого хода в относительных единицах

$$I_{10}^* = \frac{I_{10}}{I_{1H}}$$

Снятие рабочих характеристик

Рабочие характеристики представляют собой графически изображены зависимости тока статора, потребляемой из сети активной мощности, частот! вращения, скольжения, электромагнитного момента, КПД и коэффициента мощности от полезной мощности на валу двигателя:

$$I_1, P_1, n, s, M_{эм}, \eta, \cos\varphi_1 = f(P_2).$$

Нагрузкой ГПТ служат сопротивления модуля МДС2.

Питание обмотки возбуждения двигателя постоянного тока (ДПТ) осуществляется от регулируемого источника постоянного тока модуля ЛАТР.

Якорная цепь машины постоянного тока подключается на сопротивление.

Для измерения тока, напряжения статора, мощности двигателя используется модуль МИМ.

Для измерения тока якоря $I_{я}$, напряжения якоря $U_{я}$ и частоты вращения используется компьютер. Для этого выходы ДТ, ДН и ПЧН модуля СМ подключаются к входам А1, А2 и А3 соответственно модуля МВВ.

Значение частоты вращения n агрегата также можно наблюдать на индикатор СМ.

Опыт проводится в следующей последовательности:

-включить автоматы QF1 и QF2 модулей МПС и МП - переключатель SAMДС1 установить из положения «∞» в положение «0», напряжение принимав значение, равное номинальному, запускается асинхронный двигатель;

- переключатель SA1 модуля ЛАТР перевести в верхнее положение;
- ручкой автотрансформатора установить номинальное напряжение обмоток возбуждения $U_0V = U_H = 200V$, произвести первое измерение;

• переключателем SA1 МДС2 уменьшать сопротивление, пока ток якоря ПТ не достигнет номинального значения $I_{НАГР} = I_{я} \approx I_{ян} (I_{ян} = 1,3 A)$.

Выше этого значения двигатель не нагружать! SA1 в «0» не выводить!

Опытные данные, как со стороны асинхронного двигателя, так и со сторон: генератора, занести в таблицу 5.

Таблица 5 - Опытные данные рабочих характеристик

$U_{1\phi}$								
$I_{1\phi}$								
P_1								
$n, \text{об/мин}$								
$\cos\varphi_1$								
$\Delta P_{\text{ЭЛ.СТ}}, \text{Вт}$								
$\Delta P_{\text{СТ}}, \text{Вт}$								
$P_{\text{ЭМ}}, \text{Вт}$								
S								
$\Delta P_{\text{ЭЛ.Р}}, \text{Вт}$								
$\Delta P_{\text{МЕХ.АД}}, \text{Вт}$								
$\sum \Delta P, \text{Вт}$								
$P_2, \text{Вт}$								
$M_{\text{ЭМ}}, \text{Н}\cdot\text{м}$								
$\eta, \%$								
$I_{я}, \text{А}$								
$U_{\text{ОВ}}, \text{В}$								
C_m								
$M_{\text{ЭМ}}, \text{Н}\cdot\text{м}$								
$I_{я0}, \text{А}$								
$M_0, \text{Н}\cdot\text{м}$								
$M_{2\text{ГПТ}}, \text{Н}\cdot\text{м}$								
$P_{2\text{ГПТ}}, \text{Вт}$								

После проведения опыта ручку автотрансформатора вывести против часовой стрелки, переключатель SA1 модуля ЛАТР перевести в нижнее положение, отключить автоматы QF2, QF1.

Электрические потери в обмотке статора асинхронного двигателя:

$$\Delta P_{\text{эл ст}} = m_1 I_{1\phi}^2 r_1$$

где r_1 - активное сопротивление фазы статора (Приложение А).

Потери в стали при напряжении $U_{1\phi}$:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{ст1}} \left(\frac{U_{1\phi}}{U_{1H}} \right)^2,$$

где $\Delta P_{\text{ст1}}$ - потери в стали сердечника статора при номинальном напряжении, Вт.

$$\Delta P_{\text{ст1}} = P_{10} - m_1 I_{10}^2 r_1 - \Delta P_{\text{мех.ад}} - \Delta P_{\text{мех.мпт}}$$

где r_1 - активное сопротивление фазы статора при температуре окружающей среды (Приложение А); $\Delta P_{\text{мех.ад}}$ - механические потери асинхронного двигателя (Приложение А); $\Delta P_{\text{мех.мпт}}$ - механические потери машины постоянного тока (Приложение А).

Электромагнитная мощность, Вт:

$$P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_{\text{эл ст}} - \Delta P_{\text{ст}}$$

$$\text{Скольжение: } S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \quad \text{или} \quad S = \frac{n_1 - n}{n_1},$$

где ω_1 - синхронная угловая частота вращения, рад/с; n_1 - синхронная частота вращения, об/мин; ω - текущая угловая частота вращения, рад/с; n - текущее значение частоты вращения, об/мин.

Электрические потери в обмотке ротора, Вт:

$$\Delta P_{\text{эл.р}} = P_{\text{эм}} S.$$

Суммарные потери в двигателе, Вт:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{\text{эл ст}} + \Delta P_{\text{ст}} + \Delta P_{\text{эл.р.}}$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя, Н·м:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_1}, \text{ или } M_{эм} = \frac{2\pi n_1}{60}$$

Полезный момент на валу двигателя, Н·м:

$$M_2 = M_{эм} - M_0$$
$$M_0 = \frac{P_{1\phi}}{n}$$

где M_0 - момент холостого хода АД, Н·м; $P_{1\phi}$ - мощность холостого хода (берется из опыта холостого хода); n - частота вращения холостого хода (берется из опыта холостого хода).

Полезная мощность на валу двигателя, Вт:

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P.$$

Коэффициент полезного действия, %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

Коэффициент мощности (расчетный):

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{m_1 U_1 I_{1\phi}}$$

Электромагнитный момент ГПТ, Н·м:

$$M_{эмгпт} = C_m \cdot I_{я}$$

где C_m - принимается из тарировочной кривой, $C_m = f(\omega)$ (Приложение В).

Момент холостого хода ГПТ, Н·м:

$$M_0 = C_m I_{я0},$$

где $I_{я0}$ - ток холостого хода, принимается из тарировочной кривой машины постоянного тока (Приложение В).

Полный момент на валу ГПТ, Н·м:

$$M_{2ГПТ} = M_{эмгпт} + M_0.$$

Полезная мощность на валу ГПТ, Вт:

$$P_{2zm} = M_{2zm} \omega$$

Рабочие характеристики при изменении частоты

Схема для снятия рабочих характеристик, представлена на рисунке 12.

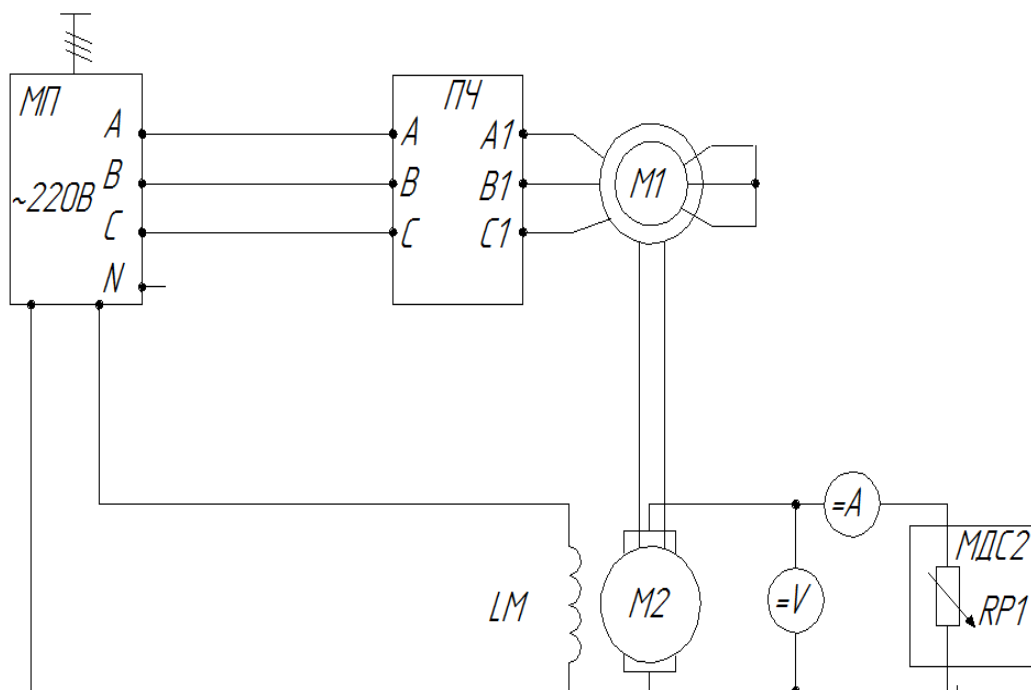


Рисунок 12 - Схема для снятия рабочих характеристик асинхронного двигателя

Асинхронный двигатель подключается непосредственно к преобразователю частоты.

Питание обмотки возбуждения двигателя постоянного тока (ДПТ) осуществляется от клемм «=220 В» модуля питания.

Якорная цепь машины постоянного тока подключается на сопротивление RP1 МДС2.

Для измерения тока, частоты выходного напряжения статора, мощности двигателя и момента асинхронного двигателя используется преобразователь частоты.

Измерение тока якоря и напряжения на якоре осуществляется с помощью приборов МИ.

Текущее значение частоты вращения n агрегата наблюдать на индикаторе СМ.

Опыт проводится в следующей последовательности:

- включить автоматы QF1 и QF2 модулей МПС и МП;
- настроить преобразователь частоты;
- установкой SA1 модуля ПЧ в крайнее положение запустить асинхронный двигатель. Установить выходную частоту напряжения (RP1) (указывается преподавателем);
- переключателем SA1 МДС2, уменьшая сопротивление, увеличивать нагрузку ГПТ пока ток якоря ГПТ не достигнет номинального значения (1,3А). Выше этого значения двигатель не нагружать! (SA1 в «0» не выводить!).

Опытные данные со стороны, как асинхронного двигателя, так и со стороны генератора, занести в таблицу 6.

Таблица 6 – Опытные данные рабочих характеристик

$f, Гц$								
$I_{1\phi}, А$								
$P_1, Вт$								
$n, об/мин$								
$\cos\varphi_1$								
$\Delta P_{эл ст}, Вт$								
$\Delta P_{мех ад}, Вт$								
$\sum \Delta P, Вт$								
$P_2, Вт$								
$M_{эм}, Н\cdot м$								
$\eta, \%$								
$I_я, А$								
$U_{об}, В$								
C_m								
$M_{эм}, Н\cdot м$								
$I_{я0}, А$								
$M_0, Н\cdot м$								

$M_{2ГПТ}, Н\cdot м$								
$P_{2ГПТ}, Вт$								

После проведения опыта отключить автоматические выключатели QF1, QF2. установить модули в исходное состояние.

$U_{л}$ - линейное напряжение на статоре, определяется из соотношения:

$$\frac{U}{f} = const$$

$$U_{л} = f \cdot const$$

U - берется из параметра U_{ns} меню drC; f - берется из параметра F_{rs} меню drC.

Электрические потери в обмотке статора асинхронного двигателя, Вт:

$$\Delta P_{элст} = m_1 I_{1\phi}^2 r_1$$

где r_1 -активное сопротивление фазы статора (Приложение Б), Ом.

Потери в стали при напряжении U_{ϕ} , Вт:

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст1} \left(\frac{U_{\phi}}{U_{1H}} \right)^2$$

где $\Delta P_{ст1}$ -потери в стали сердечника статора при номинальном напряжении (Приложение Б), Вт; U_{1H} - номинальное фазное напряжение, В.

U_{ϕ} - фазное напряжение электродвигателя, В:

$$U_{\phi} = \frac{U_{л}}{\sqrt{3}}$$

Электромагнитная мощность, Вт:

$$P_{\omega_0 - \omega} = P_1 - \Delta P_{эл1} - \frac{\Delta P_{ст}}{n_0 - n}$$

Скольжение:

$$S = \frac{\omega_0 - \omega}{\omega_0} \quad \text{или} \quad \frac{n_0 - n}{n_0}$$

где ω - текущая угловая частота вращения, рад/с; n - текущее значение частоты вращения, об/мин, ω_0 - синхронная угловая частота вращения, рад/с; n_0 - синхронная частота вращения, об/мин.

Электрические потери в обмотке ротора, Вт:

$$\Delta P_{эл.р} = P_{эм} S.$$

Суммарные потери в двигателе, Вт:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{эл1} + \Delta P_{см} + \Delta P_{эл2} + \Delta P_{МЕХ.АД}$$

Электромагнитный момент асинхронного двигателя, Н*м:

$$M_{эм} = \frac{P_{эм}}{\omega_0}, \text{ или } M_{эм} = \frac{P_{эм}}{2\pi n_0 \cdot 60}$$

Полезный момент на валу двигателя, Н*м:

$$M_2 = M_{эм} - M_0$$

Полезная мощность на валу двигателя, Вт:

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P.$$

Коэффициент полезного действия, %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

Коэффициент мощности (расчетный):

$$\cos \varphi_1 = \frac{P}{m_1 U_1 I_{1\phi}}$$

Электромагнитный момент ГПТ, Н*м:

$$M_{эмгпт} = C_m I_{я}$$

где C_m - принимается из тарировочной кривой, $C_m = f(\omega)$ (Приложение В).

Момент холостого хода ГПТ, Н*м:

$$M_0 = C_m I_{я0}$$

где $I_{я0}$ - ток холостого хода принимается из тарировочной кривой машины постоянного тока (Приложение В) и пропорционален механическим потерям и потерям в стали ГПТ.

Полный момент на валу ГПТ:

$$M_{2ГПТ} = M_{эм ГПТ} + M_0;$$

Полезная мощность на валу ГПТ, Вт:

$$P_2 = M_{эм ГПТ} \cdot \omega$$

Рабочие характеристики представляют собой графически изображенные зависимости тока статора, потребляемой из сети активной мощности, частоты вращения, скольжения, электромагнитного момента, КПД и коэффициента мощности от полезной мощности на валу двигателя:

$$I_1, P_1, n, s, M_{эм}, \eta, \cos\varphi_1 = f(P_2) \quad n p u f_1 = const \quad U_1 = const.$$

Расчет параметров асинхронного двигателя

Опыт холостого хода и короткого замыкания позволяет рассчитать параметры асинхронного двигателя и построить схему замещения.

Из опыта холостого хода можно определить:

- активное сопротивление намагничивающей цепи:

$$r_m \approx \frac{\Delta P_{CT1}}{m_1 I_{10}^2};$$

- полное сопротивление намагничивающей цепи:

$$z_m \approx \frac{U_{1\Phi H}}{I_{10}};$$

- индуктивное сопротивление намагничивающей цепи:

$$x_m \approx \sqrt{z_m^2 - r_m^2}.$$

Из опыта короткого замыкания можно определить:

- полное сопротивление:

$$z_K \approx \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1K}};$$

- активное сопротивление:

$$r_K \approx \frac{P_{1K}}{m_1 I_{1K}^2}; \quad r_2 = r_K - r_1$$

- индуктивное сопротивление:

$$x_K \approx \sqrt{z_K^2 - r_K^2}; \quad x_1 \approx x_2 = \frac{x_K}{2}$$

Т-образная схема замещения асинхронного двигателя представлена на рисунке 13.

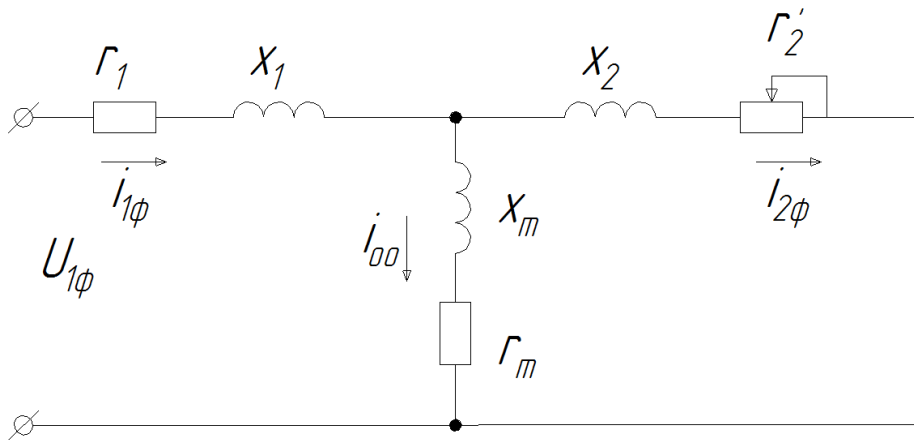


Рисунок 13 - Т-образная схема замещения асинхронного двигателя

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как изменить направление вращения асинхронного двигателя?
2. Как изменится момент асинхронного двигателя при понижении напряжения питающей сети?
3. Может ли асинхронный двигатель создавать момент при синхронной частоте вращения, т.е. может ли он вращаться с синхронной частотой вращения?
4. Как изменяется ток статора двигателя при повышении напряжения и неизменной нагрузке на валу двигателя?
5. Объяснить физический смысл зависимости $\cos\varphi = f(P;)$.

Лабораторная работа №5

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование рабочих свойств электродвигателя путем снятия соответствующих опытных характеристик.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

- Изучить схемы для исследования асинхронного электродвигателя с фазным ротором (в дальнейшем изложении АДФР).
- Исследовать двигатель в режиме короткого замыкания.
- Исследовать двигатель в режиме холостого хода.
- По опытам холостого хода и короткого замыкания рассчитать параметры двигателя, построить схему замещения.
- Снять рабочие характеристики двигателя по методу непосредственной нагрузки при введении сопротивлений в цепь ротора.
- Провести обработку экспериментальных данных, составить отчет и сделать заключение по работе.

Пояснения к работе

В лабораторной работе используются следующие модули:

- модуль питания стенда (МПС);
- модуль питания (МП);
- силовой модуль (СМ);
- модуль измерителя мощности (МИМ);
- модуль добавочных сопротивлений №1 (МДС1);
- модуль добавочных сопротивлений №2 (МДС2);
- модуль ввода/вывода (МВВ).

Перед проведением лабораторной работы необходимо привести модули в исходное состояние:

- переключатель SA1 МДС№1 установить в положение «∞»;
- переключатель SA1 МДС№2 установить в положение «∞».

Исследуемый асинхронный двигатель входит в состав электромашинного агрегата, включающего в себя собственно исследуемый двигатель М1, нагрузочный генератор - машину постоянного тока - М2, импульсный датчик скорости М3.

Для проведения работы на персональном компьютере должно быть загружено ПО DeltaProfi и выбрана соответствующая лабораторная работа.

Опыт короткого замыкания

Опыт короткого замыкания проводится при неподвижном (заторможенном) роторе $S = 1$ и пониженном напряжении, при котором ток статора примерно равен номинальному току статора $I_{IK} \approx I_{IH}$. Схема для проведения опыта короткого замыкания представлена на рисунке 14.

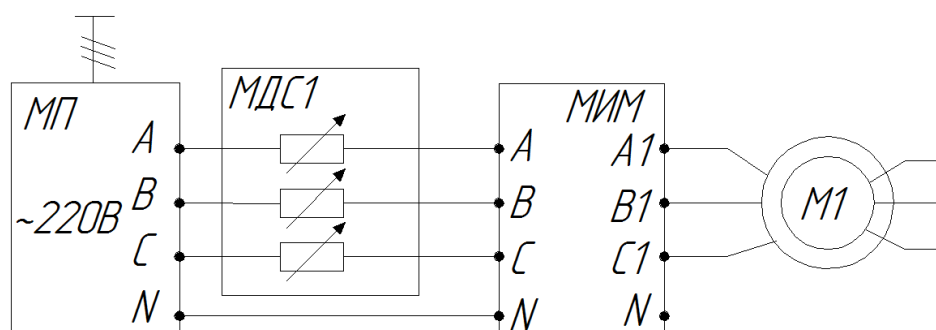


Рисунок 14 - Схема для проведения опыта короткого замыкания

Асинхронный электродвигатель подключается через измеритель мощности модуля МДС1 непосредственно к модулю МП.

Торможение двигателя осуществляется путем установки металлического стержня в отверстие полумуфты.

Понижение напряжения достигается включением добавочного сопротивления в цепь статора.

Ток статора, напряжение статора, мощность и коэффициент мощности электродвигателя измеряется модулем МИМ.

Опыт проводится в следующей последовательности:

- включить автоматические выключатели QF1 и QF2 соответственное МПС и МП;
- переключателем SA1 МДС№1 вводить сопротивление в цепь статора до тех пор, пока ток статора примерно будет равен номинальному.

Данные занести в таблицу 7.

Таблица 7 – Результаты опыта короткого замыкания

Данные опыта				Расчётные данные							
$U_{1фк}$	$I_{1фк}$	$P_{1фк}$	$\cos\varphi_{1к}$	$P_{1к}$	$\Delta P_{элст}$	$\Delta P_{ст}$	$\Delta P_{эмк}$	$M_{ЭМК}$	z_k	r_k	x_k
В	А	Вт		Вт	Вт	Вт	Вт	Нм	Ом	Ом	Ом

После проведения опыта отключить автоматические выключатели QF1, QF2, установить модули в исходное состояние.

Удалить металлический стержень из электромашинного агрегата.

По данным опыта короткого замыкания определить пусковой ток и пусковой момент при $s=1$.

Трехфазная активная мощность при опыте короткого замыкания, Вт

$$P_{1к} = m_{1к} \cdot P_{1фк}$$

Электрические потери в цепи статора, Вт

$$\Delta P_{элст} = m_1 I_{1к}^2 r_1$$

Потери в стали при напряжении $U_{1к}$, Вт

$$\Delta P_{ст} = \Delta P_{ст1} \left(\frac{U_{1к}}{U_{1н}} \right)^2$$

где $\Delta P_{ст1}$ -потери в стали при номинальном напряжении, Вт.

Электромагнитная мощность при опыте короткого замыкания, Вт

$$P_{эмк} = P_{1к} - \Delta P_{элст} - \Delta P_{ст}$$

Электромагнитный момент при опыте короткого замыкания, Н·м

$$M_{эмк} = \frac{P_{эмк}}{\omega_1}, \text{ или } M_{эмк} = \frac{P_{эмк}}{2\pi n_1 \cdot 60}$$

где n_1 - синхронная частота вращения, об/мин; ω - синхронная угловая частота вращения, рад/сек; где p - число пар полюсов (Приложение Б).

$$\omega_1 = \frac{2\pi \cdot f}{p}$$

Электромагнитный момент при номинальном напряжении, Н·м

$$M_{эмн} = M_{эмк} \left(\frac{U_{1н}}{U_{1к}} \right)^2$$

Кратность пускового момента

$$M_{п*} = \frac{M_{эмн}}{M_H}$$

$$M_H = \frac{P_{2н}}{\omega_H}$$

где $P_{2н}$ и ω_H - номинальная мощность на валу и угловая номинальная частота вращения (Приложение А).

Кратность пускового тока

$$I_{п*} = \frac{I_{1к}}{I_{1н}} \cdot \frac{U_{1н}}{U_{1к}}$$

Опыт холостого хода

Исследование двигателя в режиме холостого хода проводится для одного значения напряжения, равного номинальному и позволяет оценить величину тока холостого хода, а также потери в стали при номинальном напряжении.

Схема для проведения опыта холостого хода представлена на рисунке 15.

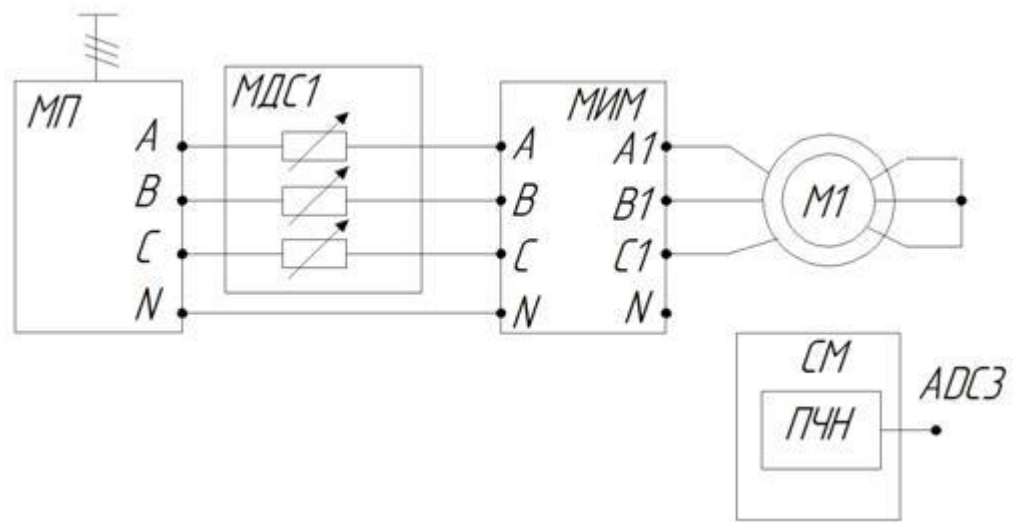


Рисунок 15 - Схема для проведения опыта холостого хода

Ток статора, напряжение статора, мощность и коэффициент мощности электродвигателя измеряется модулем МИМ.

Измерение скорости осуществляется с помощью компьютера.

Выход ПЧН модуля СМ подключается к входу ADC3 модуля МВВ.

Опыт проводится в следующей последовательности:

-включить автоматические выключатели QF1 и QF2 соответственное МПС и МП;

-переключатель SA1 МДС№1 установить из положения «∞» в положение «0», напряжение принимает значение, равное номинальному, запускается асинхронный двигатель.

Данные опыта занести в таблицу 8.

Таблица 8 – Результаты опыта холостого хода

Данные опыта				Расчётные данные							
$U_{1фк}$	I_{10}	$P_{1ф}$	n	ω	P_{10}	$\cos\varphi_{10}$	$\Delta P_{элст}$	P_{0m}	ΔP_{cm}	ΔP_{cm1}	I_{10}^*
В	А	Вт	Об/м ин	Рад/ сек	Вт		Вт	Вт	Вт	Вт	

После проведения опыта отключить автоматические выключатели QF2, QF1, установить модули в исходное состояние.

Расчетные данные

Коэффициент мощности $\cos\varphi_{10}$:

$$\cos\varphi_{10} = \frac{P_{10}}{m_1 U_{1\Phi H} I_{1\Phi}}$$

где P_{10} - активная мощность трех фаз, Вт.

$$P_{10} = m_1 P_{1\Phi}$$

Электрические потери в цепи статора, Вт:

$$\Delta P_{\text{ЭЛСТ}} = m_1 I_{1K}^2 r_1$$

Потери в стали сердечника статора при номинальном напряжении, Вт:

$$\Delta P_{\text{cm1}} = P_{10} - \Delta P_{\text{ЭЛСТ}} - \Delta P_{\text{МЕХ.АД}} - \Delta P_{\text{МЕХ.МПП}},$$

где r_1 - активное сопротивление фазы статора при температуре окружающей среды, Ом (Приложение Б); $\Delta P_{\text{МЕХ.АД}}$ - механические - потери асинхронного двигателя, Вт (Приложение Б); $\Delta P_{\text{МЕХ.МПП}}$ - механические потери машины постоянного тока, Вт (Приложение Б).

Потери в стали сердечника статора при любом другом напряжении могут быть пересчитаны через квадрат напряжения:

$$\Delta P_{\text{cm}} = \Delta P_{\text{cm1}} \left(\frac{U_1}{U_{1H}} \right)^2$$

где ΔP_{cm} - потери в стали при любом значении напряжения U_1 , Вт.

Значение тока холостого хода в относительных единицах:

$$I_{10}^* = \frac{I_{10}}{I_{1H}}$$

Расчет параметров асинхронного двигателя

Опыт холостого хода и короткого замыкания позволяет рассчитать параметры асинхронного двигателя и построить схему замещения.

Из опыта холостого хода определяем:

- активное сопротивление намагничивающей цепи:

$$r_m \approx \frac{\Delta P_{CT1}}{m_1 I_{10}^2}$$

- полное сопротивление намагничивающей цепи:

$$z_m \approx \frac{U_{1\Phi H}}{I_{10}}$$

- индуктивное сопротивление намагничивающей цепи:

$$x_m \approx \sqrt{z_m^2 - r_m^2}$$

Из опыта короткого замыкания определяем:

$$z_K \approx \frac{U_{1\Phi H}}{I_{1K}}$$

- полное сопротивление:

$$\approx \frac{P_{1K}}{m_1 I_{1K}^2}$$

- активное сопротивление: $r_K = r_K - r_1$;

- индуктивное сопротивление: $x_K \approx \sqrt{z_K^2 - r_K^2}$; $x_1 \approx x_2 = \frac{x_K}{2}$

T-образная схема замещения асинхронного двигателя представлена на рисунке 16.

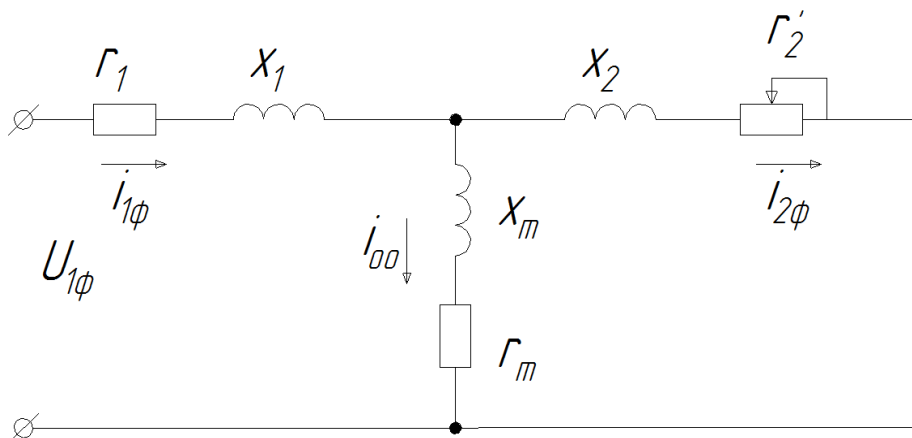


Рисунок 16 - Схема замещения асинхронного двигателя

Снятие рабочих характеристик

Схема для снятия рабочих характеристик представлена на рис. 17.

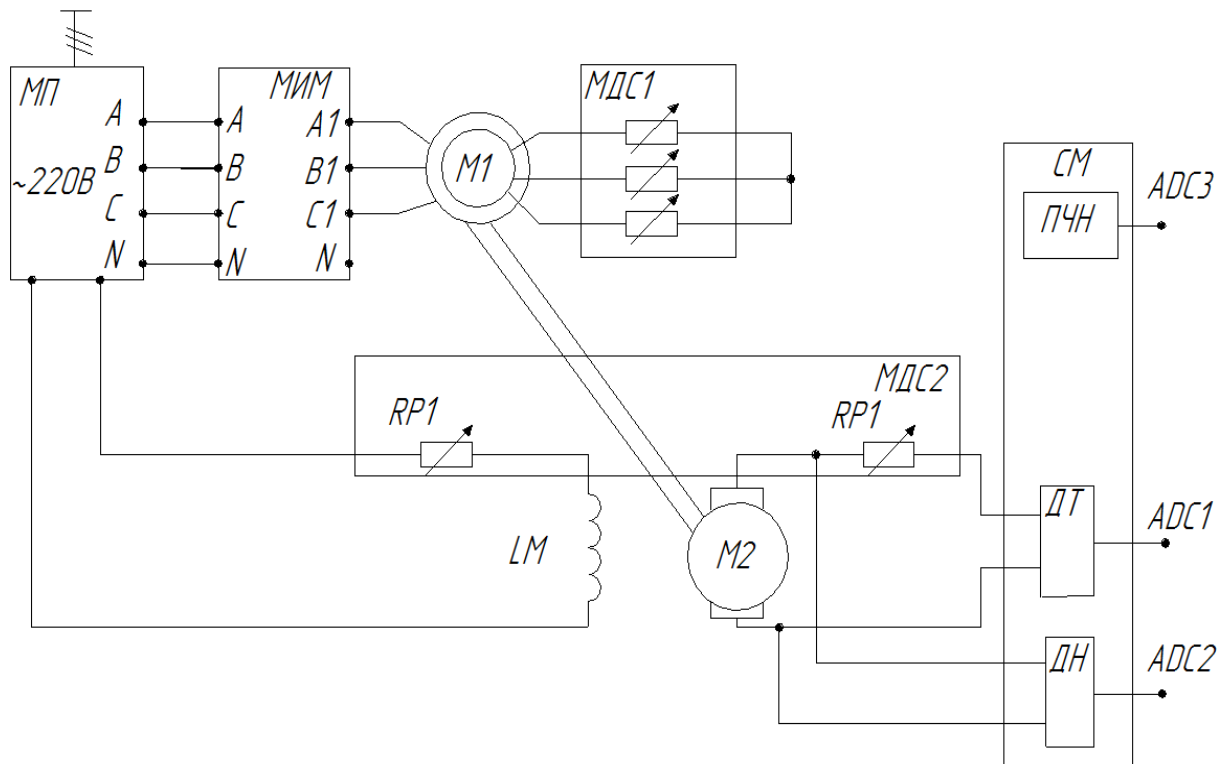


Рисунок 17 - Схема для снятия рабочих характеристик

Асинхронный двигатель подключается непосредственно к преобразователю частоты.

Ротор электродвигателя включается по схеме «звезда» через сопротивление МДС№1.

Питание обмотки возбуждения двигателя постоянного тока через сопротивление RP2 модуля МДС2 осуществляется от клемм «=220В» модуля МП.

Якорная цепь машины постоянного тока подключается на сопротивление RP1 модуля МДС2.

Для измерения тока, частоты выходного напряжения статора, мощности двигателя и коэффициента мощности асинхронного электродвигателя используется модуль МИМ.

Значения тока якоря $I_{я}$, напряжения якоря $U_{я}$, частоту вращения наблюдать на экране персонального компьютера. Для этого выходы датчиков

тока и напряжения, а также выход ПЧН силового модуля соединяются с входами А1, А2, А3 модуля МВВ.

Измерение тока ротора осуществляется с помощью прибора модуля МИ.

Текущее значение частоты вращения п агрегата также можно наблюдать на индикаторе СМ.

Рабочие характеристики снимаются при нескольких значениях сопротивления в цепи ротора (рекомендуемое значение сопротивления $R_{доб}=50...200 \text{ Ом}$).

Опыт проводится в следующей последовательности:

- переключателем SA1 модуля МДС1 ввести сопротивление (задается преподавателем);
- включить автоматы QF1 и QF2 модулей МПС и МП, запустится асинхронный двигатель.

Нагрузкой ГПТ служат сопротивления RP1 модуля МДС2.

- переключателем SA1 МДС2, уменьшая сопротивление, увеличивать нагрузку ГПТ, пока ток якоря ГПТ не достигнет номинального значения $I_{нагр}=I_{я}=I_{ян} (I_{ян}=1,3 \text{ А})$. **Выше этого значения двигатель не нагружать! SA1 в «0» не выводить!**

- изменить сопротивление в цепи ротора и повторить опыт.

Опытные данные со стороны, как асинхронного двигателя, так и генератора, занести в таблицу 9.

Таблица 9 – Опытные данные рабочих характеристик

$U_{1\phi}, \text{ В}$								
$I_{1\phi}, \text{ А}$								
$P_1, \text{ Вт}$								
$n, \text{ об/мин}$								
$\cos\varphi_1$								
$\Delta P_{эл ст}, \text{ Вт}$								

$\Delta P_{CT}, \text{ Вт}$								
$\Delta P_{ЭМ}, \text{ Вт}$								
S								
$\Delta P_{ЭЛР}$								
$\Delta P_{МЕХ АД}$								
$\Delta P_{ЭЛ ДОБ}$								
$\sum \Delta P, \text{ Вт}$								
$P_2, \text{ Вт}$								
$M_{ЭМ}, \text{ Н}\cdot\text{м}$								
$I_{ЯО}, \text{ А}$								
$M_0, \text{ Н}\cdot\text{м}$								
$M_{2ГПТ}, \text{ Н}\cdot\text{м}$								
$P_{2ГПТ}, \text{ Вт}$								

После проведения опыта установить все переключатели модулей в исходное состояние, отключить автоматические выключатели QF2, QF1.

Частота вращения электродвигателя, рад/с:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}$$

Электрические потери в обмотке статора асинхронного двигателя, Вт:

$$\Delta P_{ЭЛСТ} = m_1 I_{1\phi}^2 r_1$$

где r_1 - активное сопротивление фазы статора, приводится в паспортных данных двигателя (Приложение Б), Ом.

Потери в стали сердечника статора при номинальном напряжении, Вт:

$$\Delta P_{cm1} = P_{10} - \Delta P_{ЭЛ1} - \Delta P_{МЕХ.АД} - \Delta P_{МЕХ.МПТ}$$

где r_1 - активное сопротивление фазы статора при температуре окружающей среды, Ом (Приложение Б); $\Delta P_{МЕХ.АД}$ - механические - потери асинхронного двигателя, Вт (Приложение Б); $\Delta P_{МЕХ.МПТ}$ - механические потери машины постоянного тока, Вт (Приложение Б).

Потери в стали сердечника статора при любом другом напряжении могут быть пересчитаны через квадрат напряжения:

$$\Delta P_{cm} = \Delta P_{cm1} \left(\frac{U_{1\phi}}{U_{1H}} \right)^2$$

Электромагнитная мощность, Вт:

$$P_{эм} = P_1 - \Delta P_{элл} - \Delta P_{cm}$$

Скольжение:

$$S = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \quad \text{или} \quad \frac{n_1 - n}{n_1}$$

Электрические потери в обмотке ротора, Вт:

$$\Delta P_{эл.р} = P_{эм} S$$

Электрические потери в добавочных сопротивлениях ротора, Вт:

$$\Delta P_{эл.доб} = 3 I_2^2 R_{доб}$$

Суммарные потери в двигателе, Вт:

$$\sum \Delta P = \Delta P_{элст} + \Delta P_{cm} + \Delta P_{эл.р} + \Delta P_{эл.доб}$$

Полезная мощность на валу двигателя, Вт:

$$P_2 = P_1 - \sum \Delta P$$

Полезный момент на валу двигателя, Н*м:

$$M_2 = \frac{P_2}{\omega}$$

Электромагнитный момент двигателя, Н*м:

$$M_{эм} = \frac{P_1}{\omega_0}$$

где ω_0 - синхронная угловая частота вращения электродвигателя, 1/с.

Коэффициент полезного действия, %:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%$$

Коэффициент мощности (расчетный):

$$\cos\varphi_1 = \frac{P}{m_1 U_{1\phi} I_{1\phi}}$$

Электромагнитный момент ГПТ, Н*м:

$$M_{эмгнт} = C_m I_{я}$$

где C_m - принимается из тарировочной кривой, $C_m = f(\omega)$ (Приложение В).

Момент холостого хода ГПТ, Н*м:

$$M_0 = C_m I_{я0},$$

где $I_{я0}$ - ток холостого хода, принимается из тарировочной кривой машины постоянного тока (Приложение В) и пропорционален механическим потерям и потерям в стали ГПТ, А.

Полный момент на валу ГПТ, Н*м:

$$M_{2ГПТ} = M_{эмгнт} + M_0$$

Полезная мощность на валу ГПТ, Вт:

$$P_{2ГПТ} = M_{2ГПТ} \omega$$

Рабочие характеристики представляют собой графически изображенные зависимости тока статора, потребляемой из сети активной мощности, частоты вращения, скольжения, электромагнитного момента, КПД и коэффициента мощности от полезной мощности на валу двигателя:

$$I_1, P_1, n, s, M_{эм}, \eta, \cos\varphi_1 = f(P_2) \text{ при } f_1 = \text{const}, U_1 = \text{const}.$$

По данным опыта построить механическую $\omega = f(M_2)$ и электромеханическую $\omega = f(I_1)$ характеристики.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. Как изменить направление вращения асинхронного двигателя?
2. Как изменится момент асинхронного двигателя при понижении напряжения питающей сети?

3. Может ли асинхронный двигатель создавать момент при синхронной частоте вращения, т.е. может ли он вращаться с синхронной частотой вращения?

4. Как изменяется ток статора двигателя при повышении напряжения и неизменной нагрузке на валу двигателя?

5. Объяснить физический смысл зависимости $\cos\varphi_1 = f(P_2)$.

6. Как влияет величина добавочного сопротивления в цепи ротора на величину момента?

7. Как влияет величина добавочного сопротивления в цепи ротора на жесткость механической характеристики?

Лабораторная работа №6

ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение способа включения асинхронной машины для работы в режиме генератора. Исследование рабочих свойств асинхронного генератора.

ПРОГРАММА РАБОТЫ

1. Изучить схему для экспериментального исследования асинхронного генератора.
2. Произвести пробный пуск асинхронного двигателя и двигателя постоянного тока.
3. Исследовать асинхронный двигатель в режиме асинхронного генератора.
4. Провести обработку экспериментальных данных, составить отчет и сделать заключение по работе.

Пояснения к работе

В лабораторной работе используются следующие модули:

- модуль питания стенда (МПС);
- модуль питания (МП);
- модуль автотрансформатора (ЛАТР);
- силовой модуль (СМ);
- модуль добавочных сопротивлений №2 (МДС2);
- модуль измерителя мощности (МИМ);
- модуль ввода/вывода (МВВ).

Перед проведением лабораторной работы необходимо привести модули в исходное состояние:

- переключатель SA1 модуля ЛАТР установить в нижнее положение, ручку автотрансформатора установить в крайнее левое положение; переключатель SA1 МДС2 установить в положение «со»;

переключатель SA2 МДС2 установить в положение «О».

Исследуемая асинхронная машина входит в состав электромашинного агрегата, включающего в себя собственно исследуемый генератор М1, приводной двигатель - машину постоянного тока - М2 и импульсный датчик скорости М3.

Для проведения работы на персональном компьютере должно быть загружено ПО DeltaProfi и выбрана соответствующая лабораторная работа.

Пробный пуск

Для подключения асинхронной машины к сети переменного тока путем непосредственного включения асинхронного генератора на сеть собирается схема представленная на рисунке 18.

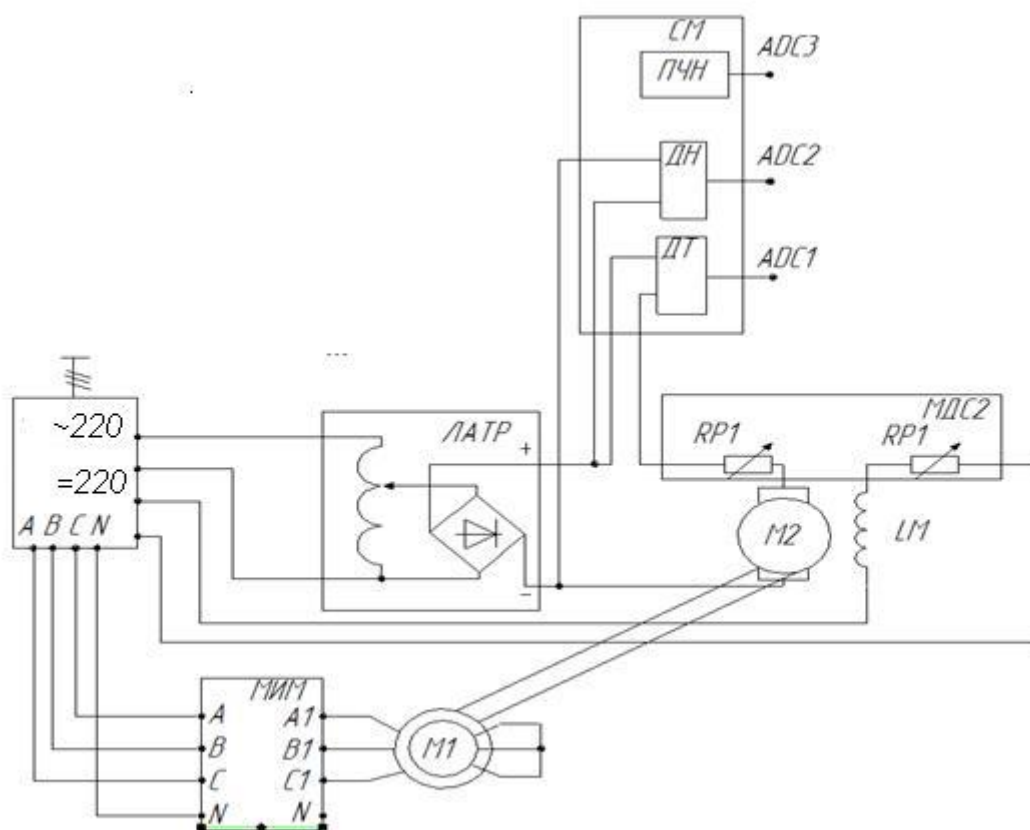


Рисунок 18 - Схема пробного пуска

Питание обмотки возбуждения двигателя постоянного тока (ДПТ) осуществляется от клемм «=220В» модуля питания. Последовательно с обмоткой возбуждения вводится добавочное сопротивление RP2 модуля МДС2.

Для питания якорной цепи ДПТ используется модуль ЛАТР. Последовательно с якорной цепью вводится добавочное сопротивление RP1 модуля МДС2.

Для измерения тока якоря $I_{я}$, напряжения якоря $U_{я}$ и частоты вращения n используется компьютер.

Для этого выходы ДТ, ДН и ПЧН силового модуля подключаются к входам ADC1, ADC2 и ADC3 соответственно модуля МВВ.

Ток статора, напряжение статора и мощность двигателя измеряется модулем МИМ. Значение частоты вращения n агрегата также можно наблюдать на индикаторе СМ.

Последовательным включением автоматов QF1 и QF2 произвести пробный пуск асинхронного двигателя.

Запустить ДПТ. Для этого переключатель SA1 МДС2 переключить в положение «160», при этом следить за током якоря. Если ток якоря возрастает, выключить QF2 модуля питания, поменять местами фазы А и В асинхронной машины.

Переключатель SA1 МДС2 перевести в положение «0».

Тумблер SA1 модуля автотрансформатора перевести в верхнее положение, поворачивая ручку автотрансформатора по часовой стрелке подать напряжение в якорную цепь ДПТ. Двигатель постоянного тока запустится.

После пробного пуска вернуть модули в исходное состояние.

Снятие рабочих характеристик

Рабочие характеристики представляют собой зависимость мощности, подводимой к асинхронному генератору P_1 фазного тока I_{ϕ} , КПД $\eta_{AGен}$, скольжения s от полной активной мощности, отдаваемой асинхронным генератором в сеть P_2 .

$$I_{\phi}, P_1, n, s, \eta, \cos\varphi_1 = f(P_2) \quad \text{при } f = const \text{ и } U_{\phi} = const.$$

Опыт проводится в следующей последовательности:

-включить автоматы QF1 и QF2 модулей МПС и МП соответственно, запустится асинхронный двигатель, зафиксировать показания холостого хода;

- переключатель SA1 МДС2 перевести в положение «0»;
- произвести запуск ДПТ так как было описано в пункте 6.1;

-увеличивая напряжение на якоре, изменять скорость ДПТ до достижения асинхронной машиной точки перехода в генераторный режим (активная мощность, потребляемая из сети, равна нулю). Если этого достигнуть не удалось, то следует переключением SA2 модуля МДС2 ослаблять поток обмотки возбуждения.

Дальнейшее увеличение напряжения на якоре или ослабление обмотки возбуждения приводит к переходу асинхронной машины в режим асинхронного генератора и отдачи в сеть активной мощности. Опыт проводить до тех пор, пока ток якоря ДПТ не будет равен 1,5А.

Данные опыта заносят в таблицу 10 и таблицу 11.

Таблица 10 – Опытные данные рабочих характеристик со стороны генератора

Со стороны асинхронного генератора							
Данные опыта				Расчетные данные			
U_{ϕ}	I_{ϕ}	P	n	P_2	$\cos\varphi$	S	$\eta_{АГен}$
В	А	Вт	об/мин	Вт			%

Таблица 11 - Опытные данные рабочих характеристик со стороны двигателя

Со стороны двигателя постоянного тока						
Данные опыта		Расчетные данные				
$U_{я}$	$I_{я}$	$M_{эм}$	$I_{я0}$	M_0	M_1	P_1
В	А	Н*М	А	Н*М	Н*М	Вт

После окончания опыта установить все переключатели модулей в исходное состояние.

Расчетные данные со стороны асинхронного генератора.

Потери в обмотке статора, Вт:

$$\Delta P_{эл} = 3 I_{\phi}^2 r_c$$

где r_c - сопротивление обмотки статора (Приложение А).

Коэффициент мощности асинхронного генератора:

$$\cos\varphi = \frac{P_2}{m_1 U_{\phi} I_{\phi}}$$

Скольжение асинхронного генератора (отрицательное, т.к. $n > n_1$):

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1}$$

КПД асинхронного генератора, %:

$$\eta_{АГен} = \frac{P_2}{P_1} 100\%$$

где P_1 -мощность, подводимая к асинхронному генератору от двигателя постоянного тока, Вт:

$$P_1 = M_1 \frac{2\pi n}{60} = M_1 \cdot \omega$$

где M_1 - полезный момент на валу двигателя постоянного тока, Н*м:

$$M_1 = M_{эм} - M_0,$$

где $M_{эм}$ - электромагнитный момент, создаваемый двигателем постоянного тока, Н*м:

$$M_{эм} = C_M I_{я}$$

Момент холостого хода двигателя постоянного тока, Н*м:

$$M_0 = C_M I_{я0}$$

где C_M - принимается по тарировочным кривым (Приложение В) в зависимости от угловой частоты вращения с учетом тока возбуждения; $I_{я0}$ - принимается по

тарифовочным кривым (Приложение В) в зависимости от угловой частоты вращения с учетом тока возбуждения.

Полная активная мощность, отдаваемая асинхронным генератором в сеть переменного тока, Вт:

$$P_2 = P_1 - P - \Delta P_{эл},$$

По расчетным данным построить рабочие характеристики асинхронного генератора: $I_\phi, P_1, \eta, \cos\varphi; S = f(P_2)$.

ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОПРОВЕРКИ

1. В чем состоят достоинства и преимущества асинхронного генератора по отношению к синхронному генератору?
2. Указать недостатки асинхронного генератора.
3. Может ли асинхронный генератор работать без сети переменного тока?
4. Каким образом создается магнитное поле в асинхронном генераторе?
5. Назовите области применения асинхронных генераторов.

6. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА

Содержание задания

Трехфазный асинхронный двигатель с фазным ротором и соединением обмоток статора и ротора в звезду предназначен для включения в сеть с номинальным линейным напряжением 380 В, частотой 50 Гц.

Требуется:

1. Начертить электромагнитную схему асинхронного двигателя и построить рабочие и механические характеристики двигателя с помощью круговой диаграммы или с использованием ЭВМ.

2. Определить перегрузочную способность и критическое скольжение асинхронного двигателя.

3. Рассчитать сопротивление фазы пускового реостата в цепи ротора, при включении которого пусковой вращающий момент асинхронного двигателя равен максимальному.

Обозначения:

P_n – номинальная мощность двигателя, кВт;

I_{1n} – номинальный, фазный ток статора, А;

n_n – номинальная частота вращения, 1/мин;

$U_{2лх}$ – напряжение на кольцах разомкнутого неподвижного ротора, В;

$R_{1(15)}$ – активное сопротивление фазы медной обмотки статора при 15°C (288 К), Ом.

Данные опыта холостого хода при линейном напряжении

$$U_{1лн} = 380 \text{ В};$$

I_o – сила тока холостого хода, А;

P_o – мощность холостого хода, кВт.

Данные опыта короткого замыкания при

$$I_{1к} = I_{1н};$$

$U_{лк}$ – линейное напряжение короткого замыкания, В;

P_k – мощность короткого замыкания, кВт.

Методические рекомендации

К пункту 1. На электромагнитной схеме асинхронной машины следует показать статор, ротор, обмотки статора и ротора, а также путь замыкания основного потока.

Построение характеристик по желанию студента и возможности выхода на ЭВМ можно провести одним из двух методов:

1. С помощью круговой диаграммы.
2. С помощью ЭВМ.

Построение рабочих и механической характеристик с помощью круговой диаграммы

Круговая диаграмма асинхронной машины строится на основании Г-образной схемы замещения по трем точкам: две точки – концы векторов тока идеального холостого хода I_{oo} и короткого замыкания $I_{1кн}$, третья точка – центр окружности.

Сначала определяют вектора токов холостого хода и короткого замыкания по величине и направлению. Для этого рассчитывают углы между вектором приложенного напряжения и векторами токов:

$$\cos \varphi_0 = P_0 / (\sqrt{3} U_{1лн} I_0), \quad (1)$$

$$\cos \varphi_k = \frac{P_k}{\sqrt{3} U_{1лн} I_{1кн}}, \quad (2)$$

$$I_{1кн} = I_{1н} U_{1лн} / U_{1лк}, \quad (3)$$

Примечание. Правильность построения векторов тока холостого хода I_o и короткого замыкания $I_{1кн}$ проверить по отрезкам потребляемой мощности, определяющим мощность холостого хода P_o и короткого замыкания $P_{кн} = P_k (I_{1кн} / I_{1н})^2$, используя для этого масштаб мощности m_p , вычисляемый по формуле (5).

Положение диаметра окружности определяет конец вектора тока идеального холостого хода I_{oo} , который располагается ниже конца вектора тока реального холостого хода I_o . Для нахождения положения вектора тока

идеального холостого хода I_{oo} необходимо вектор активной составляющей тока реального холостого хода разделить пополам. Полученная таким образом точка достаточно точно определит конец вектора I_{oo} . Диаметр окружности направляют из этой точки под углом 2γ к горизонтали.

$$\sin 2\gamma = 2I_o R_1 / U_{1\text{фн}} \gamma$$

где R_1 – активное сопротивление фазы медной обмотки статора, приведенное к расчетной температуре 75°C (348K), Ом.

$$R_1 = R_{1(15^\circ)} \frac{235 + 75}{235 + 15} = 1,24 * R_{1(15^\circ)}$$

Нахождение центра окружности и дальнейшее построение круговой диаграммы и шкал коэффициента мощности и скольжения ведутся по учебной литературе.

Масштаб тока m_i (А/мм) выбирают так, чтобы отношение $I_{1кн}/m_i$ составило $200 \div 250$ мм.

Затем рассчитывают масштабы мощности m_p (Вт/мм) и вращающего момента m_m (Нм/мм):

$$m_p = 3U_{1\text{фн}} m_i, \quad (5)$$

$$m_m = m_p / \Omega_1, \quad (6)$$

где $\Omega_1 = 314/p$ – угловая частота вращения магнитного поля статора при частоте тока 50 Гц, рад/с; $p = 3000/n_n$ – ближайшее целое число, определяющее количество пар полюсов обмотки статора при частоте 50 Гц.

Линию электромагнитных моментов проводят через конец вектора I_{oo} и точку, находящуюся на перпендикуляре, опущенном из точки $s=1$ на диаметр. Искомая точка на указанном перпендикуляре делит этот отрезок в отношении $c_1 R_2'$ к R_1 . Весь отрезок пропорционален R_k , а его верхняя часть пропорциональна $c_1 R_2'$.

$$R_k = \frac{P_k}{3I_{1H}^2}, \quad (7)$$

где R_k – активное сопротивление короткого замыкания, Ом.

На построенной круговой диаграмме указать дуги, характеризующие работу асинхронной машины двигателем, генератором и тормозом, а также точки номинального, критического и пускового режимов работы двигателя.

В дальнейшем при пользовании круговой диаграммой следует помнить, что отрезки, определяющие различные величины двигателя, перпендикулярны к диаметру окружности. К горизонтали перпендикулярны лишь отрезки подведенной мощности P_1 .

Рабочие характеристики асинхронного двигателя строят на основании данных, полученных по круговой диаграмме для значений мощности на валу $P_2=0; 0,35; 0,7; 1,0$ и $2,25 P_n$. Результаты свести в таблицу 12, на основании которых построить рабочие характеристики. (Угловая частота вращения Ω связана со скольжением s соотношением $\Omega=\Omega_1 \cdot (1 - S)$).

Таблица 12 - Рабочие характеристики

$\frac{P_2}{P_n}$	P_2	S	Ω	M	I_1	P_1	$\cos \varphi$	η
-	кВт	-	рад/с	Н·м	А	кВт	-	%

Для получения данных, необходимых к построению механических характеристик двигателя, задаются скольжением от 0 до 1 и определяют по круговой диаграмме соответствующие им вращающие моменты.

Результаты свести в таблицу 13 на основании которой построить механическую характеристику $M=f(S)$.

Необходимо при построении механической характеристики учесть, что при $S=S_k, M=M_{max}$.

Таблица 13 - Механическая характеристика

s	0	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	1,0
$M, \text{ Н, м}$							

Построение рабочих и механических характеристик с помощью ЭВМ

Для решения задачи необходимо знать параметры двигателя. Активное сопротивление статора определено по формуле (4), а короткого замыкания по (7). Индуктивное сопротивление короткого замыкания определим по формуле

$$X_k = \sqrt{\left(\frac{U_{\text{фк}}}{I_{1\text{H}}}\right)^2 - R_k^2} \quad (8)$$

А приведенное активное сопротивление фазы обмотки ротора будет:

$$C_1 R_2' = R_k - R_1, \quad (9)$$

где C_1 – коэффициент перехода от Т-образной к Г-образной схеме замещения.

Можно принять $C_1 \approx 1,04$.

Индуктивное сопротивление рассеяния статора и ротора определим приближенно:

$$X_1 = R_2' = \frac{X_k}{2}. \quad (10)$$

Определим номинальное скольжение двигателя (S_n):

$$S_n = \frac{\Omega_1 - \Omega_n}{\Omega_1}, \quad (11)$$

где $\Omega_n = \frac{\pi n_n}{30} = 0,105 n_n$ – номинальная угловая скорость вращения ротора, рад/с.

Задаваясь значениями скольжения $S = (0,2 \div 1,6) S_n$ с шагом $0,2 S_n$, производим расчет рабочих характеристик по следующему алгоритму.

Определяем ток ротора:

$$I_2' = \frac{C_1 U_{1\phi}}{\sqrt{\left(C_1 R_1 + C_1^2 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X_2')^2}}$$

Определяем косинус угла между вектором тока ротора и его активной составляющей:

$$\cos \varphi_2' = \frac{\left(C_1 R_1 + C_1^2 \frac{R_2'}{s}\right)}{\left(C_1 R_1 + C_1^2 \frac{R_2'}{s}\right)^2 + (C_1 X_1 + C_1^2 X_2')^2}$$

Определяем активную и реактивную составляющие тока холостого хода:

$$I_{0a} = \frac{P_0}{3U_{1\phi}}$$

$$I_{op} = \sqrt{I_0^2 + I_{0a}^2}$$

Определяем активную и реактивную составляющие тока статора:

$$I_{1a} = I_{0a} + \frac{I_2'}{C_1} \cos \varphi_2'$$

$$I_{1p} = I_{op} + \frac{I_2'}{C_1} \sin \varphi_2'$$

Определяем ток статора:

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$$

Определяем $\cos \varphi$:

$$\cos \varphi = \frac{I_{1a}}{I_1}$$

Определяем мощность, потребляемую из сети:

$$P_1 = 3U_{1\phi} \cdot I_{1a}$$

Определяем электрические потери:

- в статоре: $P_{\varepsilon 1} = 3I_1^2 R_1$

- в роторе: $P_{\varepsilon 2} = 3I_2'^2 R_2'$

Определяем добавочные потери:

$$P_{доб} = P_{добн} \left(\frac{I_1}{I_{1н}} \right)$$

$P_{добн} = 0,005; P_n$ – добавочные потери при номинальной нагрузке.

Определяем суммарные потери:

$$\sum P = P_{\varepsilon 1} + P_{\varepsilon 2} + P_o + P_{доб}$$

где $P_o = P_{ст} + P_{мех}$ берется из задания.

Определяем полезную мощность:

$$P_2 = P_1 - \sum P$$

Определяем угловую частоту вращения ротора:

$$\Omega = \Omega_1 (1 - s)$$

Определяем момент:

$$M = \frac{P_2}{\Omega}$$

Определяем КПД двигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%$$

Данные расчета сводим в таблицу 14.

Таблица 14 – Расчетные данные

Расчётная величина	Единица измерения	Скольжение							
		0,2 S_H	0,4 S_H	0,6 S_H	0,8 S_H	S_H	1,2 S_H	1,4 S_H	1,6 S_H
I'_2									
$\cos\varphi'$									
I_{0a}									
I_{0p}									
I_{1a}									
I_{1p}									
I_1									
$\cos\varphi$									
P_1									
$P_{\varepsilon 1}$									
$P_{\varepsilon 2}$									
$P_{\text{доб}}$									
$\sum P$									
P_2									
Ω									
M									
η									

К пункту 2. Перегрузочная способность асинхронного двигателя (кратность максимального момента) есть отношение максимального вращающего момента двигателя к номинальному.

Для определения перегрузочной способности по круговой диаграмме необходимо отрезок, определяющий его максимальный вращающий момент M_{max} , поделить на отрезок, определяющий его номинальный вращающий момент M_n . Критическое скольжение асинхронного двигателя s_k ,

соответствующее максимальному вращающему моменту, определяют по шкале скольжений.

Расчетным путем максимальный электромагнитный вращающий момент M_{max} (Н · м), критическое скольжение S_K и номинальный электромагнитный вращающий момент M_H (Н · м) определяют по формулам:

$$M_{max} = \frac{3U_{1\phi H}^2}{2\Omega_1 c_1 (R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_K^2})}, \quad (12)$$

$$S_K = \frac{c_1 R_2'}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}}, \quad (13)$$

$$M_H = \frac{P_H}{\Omega_H}, \quad (14)$$

где P_H – номинальная мощность двигателя (на валу), Вт; Ω_H – номинальная угловая скорость, определяется по формуле (11)

Полученные результаты сводятся в таблицу 15.

Таблица 15 - Перегрузочная способность асинхронного двигателя

Показатели	По круговой диаграмме или ЭВМ	По расчетам
Номинальный момент M_H		
Перегрузочная способность M_{max}/M_H		
Критическое скольжение s_K		

Студенты, выполняющие расчеты на ЭВМ, заполняют данные таблицы 15 по значению M_H , полученному с табл. 15, для значения S_H , а перегрузочную способность определяют при одном и то же значении S_K , рассчитанного по формуле (13) на ЭВМ и расчетным путем с помощью (12).

К пункту 3. Пусковой момент асинхронного двигателя становится равным максимальному, когда его критическое скольжение $S_K=1$.

Для этого режим можно записать:
$$\frac{c_1 (R_2' + R_{2д}')}{\sqrt{R_1^2 + X_K^2}} = 1, \quad (15)$$

где $R'_{2д}$ – приведенное сопротивление фазы пускового реостата в цепи ротора, Ом.

Решив (15) относительно R_2 и учтя коэффициенты трансформации между обмотками статора и ротора, получим формулу для расчета необходимого сопротивления пускового реостата для получения максимального пускового момента асинхронного двигателя:

$$R_2 = \left(\frac{1}{C} \times \sqrt{R_1^2 + X_k^2} - R_2' \right) \left(\frac{U_{2лх}}{U_{1лн}} \right)^2. \quad (16)$$

Таблица 16 - Исходные данные для самостоятельной работы

№ варианта	P_n	$I_{лн}$	n_n	$U_{2лх}$	$r_{I(15)}$	I_o	P_o	$U_{лк}$	P_k
	кВт	А	1/мин	В	Ом	А	кВт	В	кВт
1	3	6,7	1410	185	1,33	2,7	0,18	80	0,45
2	4	8,8	1420	255	0,8	3,5	0,27	79	0,465
3	2,2	5,7	930	133	1,68	2,6	0,14	78	0,41
4	3	7,6	940	185	1,0	3,4	0,23	77	0,435
5	5,5	12,3	1420	100	0,59	4,3	0,42	76	0,68
6	7,5	16,4	1420	126	0,39	5,6	0,43	75	0,78
7	4	9,8	955	76	1,23	4,4	0,25	78	0,68
8	5,5	13	955	100	0,73	6,2	0,25	75	0,89
9	3	8,3	710	61	1,64	4,2	0,13	80	0,68
10	4	10,6	710	85	1,22	5,3	0,2	79	0,8
11	10	21,6	1420	160	0,27	8,8	0,8	74	0,95
12	13	28	1420	198	0,17	11,5	1,1	73	1,0
13	7,5	16,5	960	140	0,5	6,1	0,5	75	0,98
14	10	21,4	960	100	0,34	8,4	0,7	74	1,1
15	5,5	14,1	710	115	0,64	7,1	0,3	73	0,92
16	7,5	19,0	710	150	0,4	8,5	0,5	72	1,08
17	17	35,1	1430	215	0,15	14	1,03	71	1,35
18	22	45,2	1430	275	0,1	18	1,34	70	1,52
19	13	27,2	960	195	0,3	11	0,45	71	1,55
20	17	34,7	960	230	0,2	13,8	0,55	72	1,8
21	10	24,8	715	150	0,35	13	0,4	73	1,6

22	13	32	715	185	0,25	16,5	0,5	74	1,9
23	40	77,5	1440	110	0,071	20	1,6	69	3,2
24	55	108,5	1440	160	0,038	35	2,6	68	3,4
25	30	59,5	970	125	0,09	17,5	2,0	67	2,4
26	40	78,5	975	165	0,059	23,6	1,65	66	2,75
27	22	47,5	725	95	0,154	18	0,6	67	2,5
28	30	65,5	730	130	0,092	25	1,3	65	2,9
29	75	149	1450	185	0,032	45	2,9	64	5,3
30	100	198	1450	235	0,021	59,5	4,6	63	6,4
31	55	108	960	150	0,058	27	1,0	62	5,1
32	75	144	960	215	0,034	36	2,9	61	5,3
33	40	85,5	720	120	0,085	32,5	0,9	60	4,65
34	55	114	725	160	0,05	43,4	1,4	59	4,9
35	2,8	6,7	1370	84	1,54	2,8	0,28	80	0,52
36	4,5	10,3	1375	131	0,71	4,3	0,5	78	0,56
37	1,7	5,0	905	57	2,5	2,4	0,20	79	0,47
38	2,8	7,6	920	91	1,29	3,6	0,45	78	0,56
39	7	15,5	1375	150	0,71	5,4	0,3	76	1,28
40	10	21,5	1400	207	0,454	7,5	0,4	75	1,58

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Набиев, Ф. М.** Электрические машины: учеб. пособие для вузов/ Под ред. Проф. И.И. Алиева. – М.: ИП РадиоСофт, 2008. –292с.: ил. –500экз. – ISBN:5-93037.
2. **Вольдек, А.И.** Электрические машины. Машины переменного тока : учебник для вузов/ В.В.Попов. – СПб.:Питер. – 2008. – 350с. –3000 экз.: ил.. – ISBN 978-5-469-01380-9.
3. **Вольдек, А.И.** Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы : учебник для вузов/ В.В.Попов. – СПб.:Питер. – 2008. – 320с. –3000 экз.: ил.. – ISBN 978-5-469-01380-8
4. **Девочкин, О.В.** Электрические аппараты : 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.
5. **Кацман, М.М.** Электрические машины: 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

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Паспортные и расчетные данные трансформатора

Таблица А1 – Паспортные данные трансформатора

Наименование предмета	Значение
Тип	ОСМ1 – 0,063.УЗ
Мощность, В·А	63
Номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора, В	220
Номинальное напряжение вторичной обмотки трансформатора, В	42
Активное сопротивление первичной обмотки трансформатора r_1 . при $t^\circ=20^\circ\text{C}$, Ом	30,7
Активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора r_2 при $t^\circ=20^\circ\text{C}$, Ом	2,2

Приложение Б

Таблица Б1 - Паспортные данные машины постоянного тока

Наименование параметра	Значение
Тип	ПЛ-072
Мощность, Вт	180
Номинальное напряжение питания обмотки якоря, В	220
Номинальное напряжение обмотки возбуждения, В	200
Номинальная частота вращения, об/мин	1500
Номинальный ток якоря, А	1,3
К.П.Д	0,63
Масса, кг	7,65
Сопротивление обмоток якоря $R_{Я,20^{\circ}C}$ (расчётное значение), Ом	17,5
Сопротивление обмотки возбуждения $R_{ОВ,20^{\circ}C}$	820
Механические потери, $P_{мех ДПП}$, Вт	15

Таблица Б.2 - Паспортные и расчетные данные асинхронного двигателя с фазным ротором

Наименование параметра	Значение
Тип	A1S71BY3/AIP
Мощность, Вт	370
Номинальное напряжение питания обмотки статора, В, Y	380
Номинальная частота вращения, об/мин	1370/1320
Номинальный ток фазы статора, А	1,37/1,18
Номинальный ток ротора, А	1
cosφ	0,7
Число пар полюсов	2
Номинальный момент, Н·м	1,4
Активное сопротивление статора	19

$r_{1\text{прит}}^{\circ}=27^{\circ}\text{C}$, Ом	
Активное сопротивление ротора $r_{2\text{прит}}^{\circ}=27^{\circ}\text{C}$, Ом	25
Механические потери, $P_{\text{мех АД}}$, Вт	11

Примечание: Механические характеристики, как естественные, так искусственные, желательно снимать при пониженном напряжении, а затем момент пересчитывать по формуле

$$U_{\text{пониж, л}}=220 \text{ В}, M=M_{\text{опыт}}(380/220)^2 \approx M_{\text{опыт}3}.$$

Таблица Б3 - Паспортные данные импульсного датчика скорости

Наименование параметра	Значение
Тип	TRD-S500VD
Напряжение питания, В	5
Разрешающая способность, имп/об	500

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Тарировочные кривые

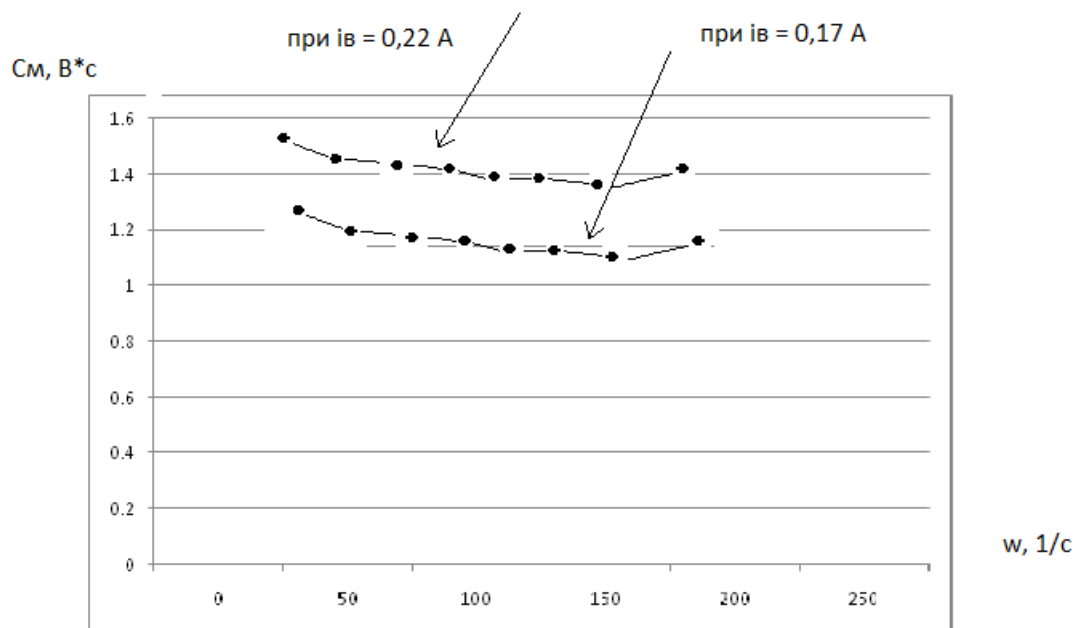


Рисунок В1 – Зависимость $C_m - f(\omega)$ машины постоянного тока ПЛ-072УЗ.

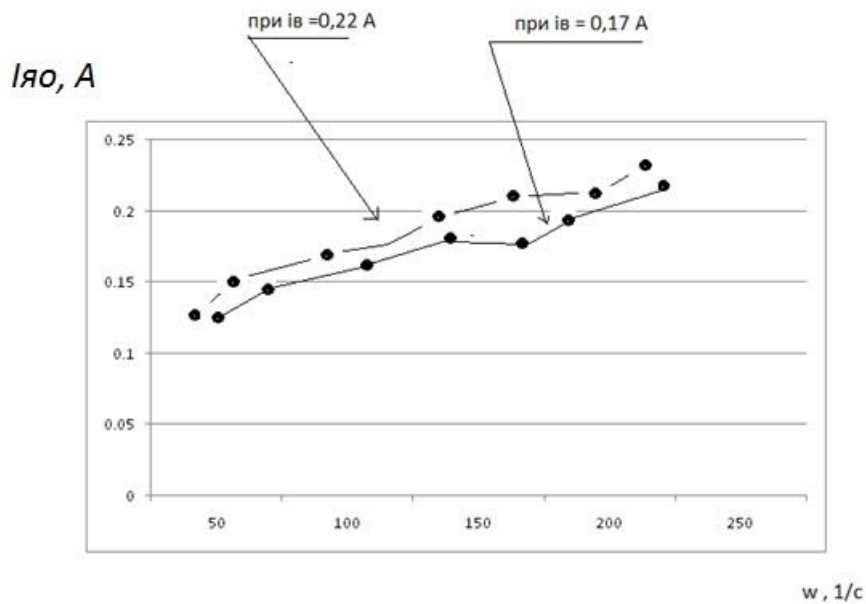


Рисунок В1 – Зависимость $I_{a0} = f(\omega)$ машины постоянного тока ПЛ-072УЗ

ПРИЛОЖЕНИЕ Г

Задание для выполнения курсовой работы по дисциплине «Электрические машины»

ВАРИАНТ	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
Напряжение, В $U_{\phi} =$	220	220	220	220	220	127	220	220	220	220
Число пар полюсов $p =$	1	3	2	4	4	2	4	3	3	1
Тип обмотки $A1 =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
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	1	1	1	1	1	1
К-т укорочения $K_u =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
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	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
Напряжение, В $U\phi=$	127	380	380	220	220	127	220	220	380	127
Число пар полюсов $p=$	1	2	1	2	3	1	4	2	2	2
Тип обмотки $A1=$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
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	1	1	1	2	1	1	1	1	1	1
К-т укорочения $Ky=$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Индукция 1 гарм., Тл	0,89	0,88	0,87	0,95	0,94	0,93	0,91	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	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
Напряжение, В $U_{\phi} =$	380	220	220	127	380	127	220	380	127	220
Число пар полюсов $p =$	1	3	2	4	4	2	1	1	2	3
Тип обмотки $A1 =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
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	1	1	1
К-т укорочения $K_u =$	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Индукция 1 гарм., Тл	0,91	0,92	0,94	0,95	0,96	0,98	0,94	0,94	0,74	0,98
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	0,14	0,11	0,1
Индукция 7 гарм., Тл	0,082	0,08	0,08	0,08	0,08	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03

Содержание

1. СТРУКТУРА, СОДЕРЖАНИЕ И ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	4
2. МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ.....	8
3. ОБЩИЕ ПРАВИЛА ОРГАНИЗАЦИИ И ПРОВЕДЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	41
4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ И ТРЕБОВАНИЯ К ЕГО ОФОРМЛЕНИЮ.....	42
5. ОСНОВНЫЕ ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ В ЛАБОРАТОРИИ.....	43
Лабораторная работа № 1 ИЗУЧЕНИЕ КОНСТРУКЦИИ ТРЕХФАЗНЫХ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЕЙ.....	46
Лабораторная работа № 2 ОДНОСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	55
Лабораторная работа № 3 ДВУХСЛОЙНЫЕ ОБМОТКИ МАШИН ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	63
Лабораторная работа № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ.....	71
Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С ФАЗНЫМ РОТОРОМ.....	87
Лабораторная работа № 6 ИССЛЕДОВАНИЕ АСИНХРОННОЙ МАШИНЫ В РЕЖИМЕ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	100
12. САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА.....	106
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	116
ПРИЛОЖЕНИЯ.....	117