

Министерство сельского хозяйства Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

Иркутский государственный аграрный университет
имени А.А. Ежевского

С. В. Сукьясов, М. В. Пильцов, Рудых А. В.

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ МАШИНЫ И АППАРАТЫ

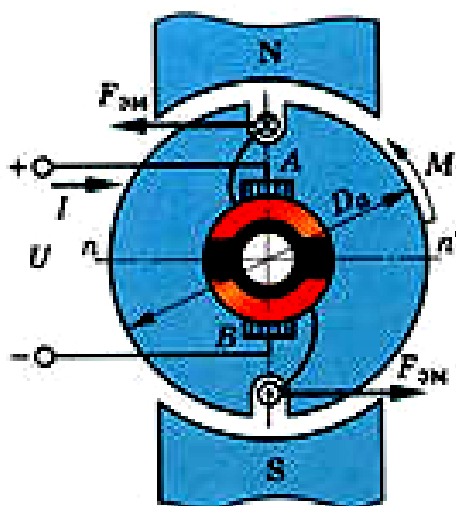
Часть 1. Электрические машины

Учебное пособие по выполнению лабораторных работ

Направление: 13.03.01 - «Теплоэнергетика и теплотехника», 13.03.02 -
«Электроэнергетика и электротехника»

Профиль: «Энергообеспечение предприятий», «Электроснабжение»

Уровень бакалавриата



Иркутск 2016

Рекомендовано к изданию научно-методическим советом
Иркутского государственного аграрного университета имени А.А. Ежевского
(протокол № _____ от _____)

Лабораторные работы по дисциплине "Электрические машины и аппараты" являются одним из видов учебных занятий, обеспечивающих связь между теорией и практикой, знакомящих студентов с конструкциями электрических машин и аппаратов, в данном случае – электрических машин.

Основная задача лабораторных занятий – проработка и закрепление лекционного материала, также важным является обучение студентов методике эксперимента, обработке экспериментальных исследований, их анализу и сравнению с теоретическими положениями.

Учебное пособие может быть использовано как дополнительный материал к лекционному курсу.

В результате освоения дисциплины «Электрические машины и аппараты» студент должен быть готов к проведению измерений и наблюдений, описанию проводимых исследований, подготовке данных для обзоров, отчетов и научных публикаций, готов к самостоятельной, индивидуальной работе, принятию решений в рамках своей профессиональной компетенции

Составитель:

кандидат технических наук, доцент С. В. Сукьясов (Иркутский ГАУ)

кандидат технических наук М. В. Пильцов (Иркутский ГАУ)

кандидат технических наук, доцент А. В. Рудых (Иркутский ГАУ)

Рецензенты:

кандидат технических наук, доцент В. В. Федчишин (ИРНТУ)

кандидат технических наук, доцент А. Д. Епифанов (Иркутский ГАУ)

Литературный редактор:

В. И. Тесля (Иркутский ГАУ)

УДК 621.313(076.5)

© С. В. Сукьясов, М. В. Пильцов, А. В. Рудых 2016

© ФГБОУ ВО Иркутский ГАУ им. А.А. Ежевского, 2016

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	4
Инструктаж по технике безопасности.....	5
Общие указания к выполнению лабораторных работ и правила сборки электрических схем.....	7
Лабораторная работа № 1	
Исследование однофазных сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах.....	9
Лабораторная работа № 2	
Тахогенератор постоянного тока.....	17
Лабораторная работа № 3	
Определение коэффициента полезного действия двигателя постоянного тока параллельного возбуждения методом холостого хода.....	23
Лабораторная работа № 4	
Исследование генератора параллельного и смешанного возбуждения..	32
Лабораторная работа № 5	
Исследование генератора независимого возбуждения.....	46
Лабораторная работа № 6	
Машины постоянного тока.....	57
Лабораторная работа № 7	
Схемы и группы соединений обмоток трансформатора.....	66
Лабораторная работа № 8	
Трансформаторы.....	74
Лабораторная работа № 9	
Исследование трехфазного асинхронного двигателя в однофазном и конденсаторном режимах.....	83
Лабораторная работа № 10	
Синхронные машины.....	90
Лабораторная работа № 11	
Асинхронные машины.....	98
Приложение 1.....	106
Приложение 2.....	107
Приложение 3.....	109
Приложение 4.....	109
Приложение 5.....	110
Литература.....	111

ВВЕДЕНИЕ

Для производства электрической энергии, передачи ее потребителям и преобразования в другие виды используют электрические машины.

Машины, в широком смысле этого понятия, - устройства, выполняющие определенные механические движения для определенной цели, с помощью таких движений механическая энергия преобразуется в электрическую или наоборот. К электрическим машинам условно относят и трансформаторы, хотя у них нет движущихся частей. В таких устройствах преобразуются лишь параметры электрической энергии, а все процессы происходят по одним физическим законам.

Современное электромашиностроение достигло огромных успехов. Разработаны и осваивают новые серии электрических машин, внедряют новые магнитные, проводниковые и изоляционные материалы, улучшающие энергетические и другие показатели машин, проводят работы по использованию явления сверхпроводимости. Созданы электродвигатели и генераторы новых конструктивных исполнений.

В сельском хозяйстве электрические машины применяют в различных электрических установках по производству и переработке сельскохозяйственной продукции (животноводческие комплексы, птицефабрики, молокозаводы и др.), в мобильной сельскохозяйственной технике (комбайны, тракторы, автомобили), на стационарных и передвижных резервных дизельных электростанциях.

ИНСТРУКТАЖ ПО ТЕХНИКЕ БЕЗОПАСНОСТИ

В установках напряжением до 380 В, где происходит большинство случаев поражения электрическим током, причиной травматизма нередко является недооценка его опасности. Опасность поражения электрическим током зависит от многих факторов: рода тока, внешней среды, длительности и пути протекания тока через организм, индивидуальных особенностей человека.

Переменный ток промышленной частоты и напряжением до 400 В более опасен, чем постоянный. Это объясняется физиологическими процессами, действующими на живую клетку. Установлено, что отдельные участки человеческого тела имеют различную чувствительность к электрическому току. Наиболее уязвимыми для тока являются поверхности лица, ладоней и подошв ног. При прохождении через тело человека электрический ток может вызвать паралич мышц, прекращение дыхания, остановку сердца. Прохождение тока через тело сопровождается выделением тепла. Этого тепла может оказаться достаточно для нагрева тканей организма до температуры 60-70 °С, при которой свертывается белок и возникает ожог. Ожоги тела возможны также от электрической дуги, возникающей при коротких замыканиях. Электрические ожоги проникают глубоко в тело, очень болезненны и долго не заживают.

Анализ причин электротравматизма показывает, что безопасную работу можно обеспечить только строгим выполнением правил по технике безопасности.

1. Приступая к выполнению лабораторной работы, необходимо прослушать инструктаж и убедиться, что напряжение на рабочем месте отсутствует, т.е. автоматические выключатели на главном щите и на рабочем стенде должны быть выключены.

2. Для сборки электрических схем использовать приборы с исправными клеммами, провода с неповрежденной изоляцией.

3. Включать схемы можно только после проверки ее преподавателем.

4. Перед включением электрической схемы следует убедиться в том, что никто из студентов не может попасть под напряжение. При каждом включении нужно предупреждать товарищей словом «включаю».

5. После подачи напряжения на рабочий стенд категорически запрещается присоединять провода к схеме, подкручивать клеммы и переставлять оборудование.

6. Электрическую схему можно разбирать только после снятия напряжения при помощи автоматических выключателей с рабочего стенда и после полной остановки электрических машин.

7. Переключения под напряжением следует производить с помощью рубильников, реостатов и других, предназначенных для этого устройств, предусмотренных в схеме по ходу выполнения работы.

8. В процессе проведения работы не следует прикасаться к токоведущим частям и аппаратам, находящимся под напряжением.

9. Запрещается самовольно снимать ограждения безопасности, кожухи, защищающие ремённые передачи и т.п.

10. Если работа ведётся с электрическими машинами, имеющими вращающиеся части, и с сопротивлениями, которые нагреваются в процессе работы, нужно убедиться, что они надёжно закрыты или принять меры, предотвращающие попадания на опасные части машины концов одежды, волос, проводов.

11. При обнаружении неисправности в электрических установках, приборах, предохранителях, сети и т.д. студент обязан немедленно прервать выполнение работы до приведения установки в надлежащий порядок.

12. При выполнении лабораторной работы следует учитывать особенность работы лабораторного оборудования и следить за надёжностью крепления проводов в винтовых зажимах при сборке схемы.

13. Для измерения нескольких напряжений одним вольтметром следует пользоваться только проводами, которые снабжены специальными, хорошо изолированными щупами.

14. Следует проводить измерения сопротивления изоляции или сопротивления обмоток специальными приборами только при полном отключении исследуемой установки от электрической сети.

15. Категорически запрещается касаться рукой или ногой вращающихся частей электродвигателей и машин или производить их торможение.

16. При несчастном случае немедленно оказать первую помощь пострадавшему. В случае необходимости вызвать скорую помощь по телефону – 03.

17. В случае пожара немедленно принять меры к ликвидации загорания и в случае необходимости вызвать пожарную команду по телефону – 01.

Следует помнить: вторичные обмотки трансформаторов тока должны быть всегда замкнуты на приборы с малым внутренним сопротивлением или накоротко и что на разомкнутых концах вторичной обмотки трансформатора тока могут возникнуть опасные, высокие напряжения; конденсатор, отключенный от источника тока, сохраняет заряд. При работе с конденсаторами необходимо их предварительно разрядить; перегорание плавкой вставки предохранителя при коротких замыканиях может сопровождаться разбрызгиванием расплавленного металла; на лабораторном столе не должно быть посторонних предметов, в особенности металлических (линеек, металлических инструментов и т.д.).

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ И ПРАВИЛА СБОРКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМ

1. Лабораторные работы выполняются бригадой студентов в количестве 3-4 человек.

2. Все лабораторные работы выполняются непосредственно под руководством преподавателя.

3. При выполнении лабораторных работ студент обязан хорошо усвоить цель, содержание, физическую сущность и методику проведения этих работ. К выполнению работы студент допускается лишь с разрешения преподавателя, проверившего подготовленность студента.

4. При сборке электрических схем студенты должны сначала собрать последовательные (токовые) цепи, а затем присоединить параллельные цепи (вольтметры, параллельные обмотки ваттметров и счетчиков, цепи управления и сигнализации), обращая особое внимание на плотность контактов.

5. Собранная схема обязательно проверяется всеми студентами, выполняющими данную работу. При этом обратить особое внимание на следующее:

- целостность соединительных проводов;
- соответствие приборов роду тока и пределам напряжения;
- положение рукояток аппаратов управления и автоматизации, которые должны находиться в отключенном состоянии.

6. Включать собранную схему студенты должны только после проверки её преподавателем.

7. Выполнение лабораторной работы студенты должны вести в строгом соответствии с программой работы и порядком выполнения. В случае неясности нужно обращаться к преподавателю.

8. Результаты измерений студенты должны заносить в заранее заготовленные таблицы наблюдений (протокол к лабораторной работе). Экспериментальная часть работы считается выполненной только после проверки и утверждения результатов опытов преподавателем.

9. Если результаты наблюдений будут признаны неудовлетворительными, то опыт необходимо повторить.

10. После окончания работы с разрешения преподавателя студенты должны разобрать схему, уложить на места провода и приборы, сдать преподавателю выдаваемые приборы, привести в порядок рабочее место.

11. Результаты измерений и наблюдений, полученные в процессе выполнения работы, частично обрабатываются в лаборатории, а окончательно – дома. По этим данным составляется отчет о выполненной работе в соответствии со всеми пунктами, указанными в программе работы.

12. Электрические схемы выполняются в строгом соответствии с правилами начертания и обозначения элементов согласно ГОСТ (см. приложение 1, 2).

13. Графики изображаются в отчете с использованием карандаша. Координатные оси должны иметь обозначения изображаемых величин, размерность и масштаб.

14. При сдаче отчета преподаватель опрашивает студента в объеме материала выполненной работы. Работа зачитывается в том случае, если студент показывает знание цели, физической сущности, методики выполнения работы, использованных машин и оборудования, может объяснить и проанализировать полученные результаты.

При сборке электрической цепи пользуйтесь следующими правилами:

1. Электрическую цепь начинайте собирать с клеммы, соответствующей входу исследуемой схемы. В первую очередь собирайте последовательную (токовую) цепь, а затем подключайте параллельные ветви. Ветви, состоящие из вольтметров, параллельных обмоток ваттметров, фазометров, подсоединяйте в последнюю очередь;

2. Соблюдайте полярность при подключении приборов в сеть постоянного тока;

3. Подсоединяйте источники питания через ключ или рубильник;

4. Перед включением электрической цепи установите регуляторы напряжения в положение, обеспечивающее минимальный ток во всех его элементах, увеличьте до максимума сопротивления реостатов, расширьте пределы измерений используемых многопредельных приборов;

5. Включайте исследуемую электрическую цепь только после ее проверки преподавателем.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОФАЗНЫХ СЕЛЬСИНОВ В ИНДИКАТОРНОМ И ТРАНСФОРМАТОРНОМ РЕЖИМАХ

Цель работы:

Изучить устройство, принцип работы, назначение и технические характеристики сельсинов, режимы их работы. Приобрести практические навыки в определении точности показаний и основных параметров сельсинов. Получить экспериментальное подтверждение теоретических сведений о свойствах сельсинов.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить конструкцию и принцип работы сельсинов.
2. Собрать электрические схемы.
3. Провести соответствующие измерения.
4. Выполнить расчеты и построить графики.
5. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Сельсины (или самосинхронизирующиеся) служат для синхронного поворота или вращения двух или нескольких механически не связанных осей.

Существует два вида синхронной связи: система «электрического вала» (синхронного вращения) и система «передачи угла» (синхронного поворота). В системах синхронного вращения применяют трехфазные сельсины или обычные трехфазные асинхронные двигатели с фазным ротором. Обмотки роторов двигателей соединяют линией связи между собой, а обмотки статоров подключают к общей сети трехфазного тока. В системах синхронного поворота применяют, как правило, однофазные сельсины.

В простейшем случае синхронную связь осуществляют с помощью двух сельсинов, электрически соединенных между собой. Один из них, механически соединенный с ведущей осью, называют сельсином-датчиком СД (BC), а другой, соединенный с ведомой осью непосредственно или с помощью промежуточного исполнительного двигателя – сельсином-приемником СП (BE). Система синхронной связи работает так, что при повороте ротора сельсина-датчика на некоторый угол α_D ротор сельсина-приемника поворачивается на такой же угол α_P и угол рассогласования (α) в идеальном случае сводится к нулю $\alpha = \alpha_D - \alpha_P$.

Сельсины применяют в радиолокационных системах с вращающейся антенной, в механизмах разводки мостов, ворот шлюзов, в виде датчиков углов поворота и скорости вращения, в установках бумажной промышленности, индикации о положения какого-либо регулирующего органа – клапана, задвижки, заслонки, вентиля и т. д.

По конструкции однофазные сельсины делят на контактные и бесконтактные. Сельсины имеют две обмотки: первичную, называемую обмоткой возбуждения, и вторичную – обмотку синхронизации. Контактные однофазные сельсины могут быть явнополюсными с размещением полюсов на роторе или статоре и неявнополюсными (рис. 1.1). В явнополюсных сельсинах однофазную обмотку возбуждения размещают на явно выраженных полюсах ротора или статора. Обмотку синхронизации выполняют по типу трехфазной в виде трех обмоток, сдвинутых в пространстве на 120° и соединенных звездой. Обмотку выполняют распределенной и размещают в пазах статора или ротора. Выводы обмотки ротора подключены к контактными кольцам, на которых находятся щетки. Для повышения надежности скользящего контакта кольца и щетки выполняют из сплавов серебра.

Сельсины с обмоткой возбуждения на роторе имеют существенные преимущества перед сельсинами с обмоткой возбуждения на статоре. При уменьшении числа скользящих контактов уменьшаются габаритные размеры, масса сельсина. Кроме того, проще осуществляется демпфирование явнополюсного ротора с помощью короткозамкнутой демпферной обмотки (обмотка из стержней, которая закладывается в полузакрытые пазы на наконечниках полюсов роторов и соединяется между собой гибкими перемычками), она обеспечивает быстрое затухание собственных колебаний ротора при переходе его из одного положения в другое.

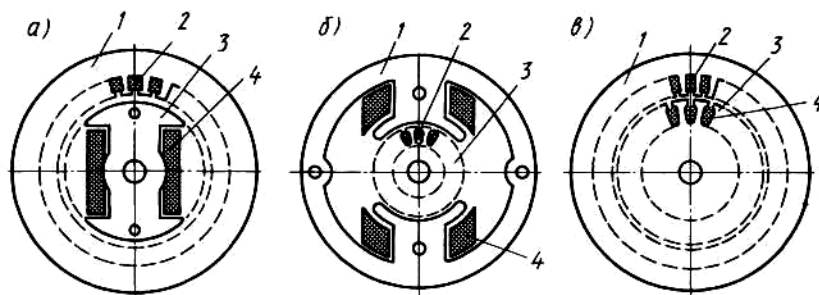


Рисунок 1.1 – Схемы магнитной системы однофазных контактных сельсинов:

- а) система с явнополюсным ротором; б) система с явнополюсным статором; в) система с неявнополюсным статором и ротором
 1 – статор; 2 – обмотка синхронизации; 3 – ротор; 4 – обмотка возбуждения

Контактные сельсины обычно выполняют двухполюсными, что обеспечивает их самосинхронизацию в пределах одного оборота. Статор и ротор собирают из листов электротехнической стали, для ослабления зубцовых гармоник делают скос пазов (рис. 1.2).

У бесконтактных сельсинов отсутствуют скользящие контакты (рис. 1.3) и обе обмотки размещены на статоре. Трехфазную обмотку синхронизации размещают в пазах магнитопровода статора, а обмотку возбуждения выполняют в виде двух тороидальных катушек, охватывающих ротор с двух сторон. Ротор сельсина представляет собой цилиндр, состоящий из двух

пакетов электротехнической стали (полюсов), разделенных большим косым зазором, заполненным немагнитным материалом (алюминиевым сплавом, пластмассой). Магнитный поток обмотки возбуждения замыкается от одного полюса ротора к другому через магнитопровод статора. Поэтому при повороте ротора будет изменяться в пространстве положение оси магнитного потока возбуждения относительно обмоток синхронизации и, следовательно, величина ЭДС, индуцируемой в фазах обмотки синхронизации, будет зависеть от поворота ротора.

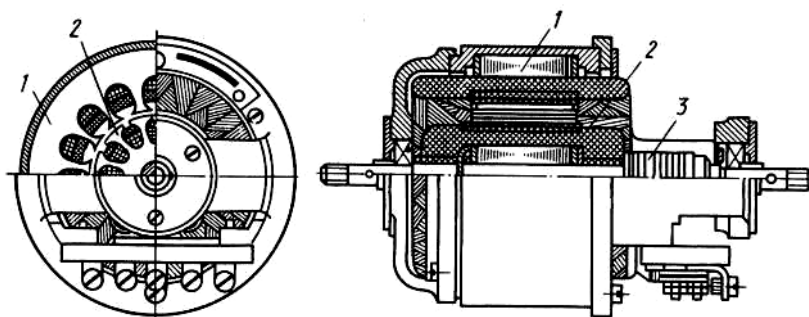


Рисунок 1.2 – Устройство контактного сельсина:
1 – статор; 2 – ротор; 3 – контактные кольца

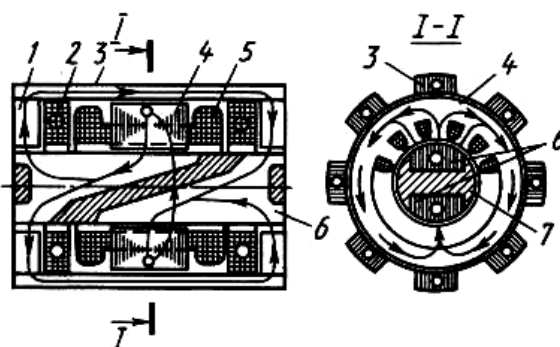


Рисунок 1.3 – Электромагнитная схема бесконтактного сельсина:
1 – тороиды; 2 – обмотка возбуждения; 3 – внешний магнитопровод; 4 – пакет статора; 5 – обмотка синхронизации; 6 – пакеты ротора; 7 – промежуток из немагнитного материала

Различают индикаторный и трансформаторный режимы работы сельсинов.

При индикаторном режиме ротор сельсина-приемника соединяют непосредственно с ведомой осью, что допустимо лишь при малом значении тормозного момента на этой оси. Как правило, на оси ротора СП закрепляется стрелка прибора-индикатора, установленного на пульте управления и показывающего положение какого-либо недоступного для обслуживающего персонала механизма. С последним соединяют ротор сельсина-датчика (рис. 1.4). Обмотки возбуждения ОВ сельсина-датчика СД и сельсина-приемника СП подключены к общей сети переменного тока с напряжением U и частотой f , а обмотки синхронизации ОС, размещенные на роторах сельсинов, соединены между собой линией связи ЛС. В каждом

сельсине магнитодвижущей силой обмотки возбуждения создается пульсирующий магнитный поток Φ_B , который индуцирует в трех фазах обмотки синхронизации ЭДС, совпадающих во времени и разных по величине, например, в фазах СД (аналогично и в фазах СП):

$$\begin{aligned} \dot{A}_{\dot{A}} &= E_{MAX} \cdot \cos \alpha_{\dot{A}}; \\ \dot{A}_{\dot{A}} &= E_{MAX} \cdot (\cos \alpha_{\dot{A}} - 120^\circ); \\ \dot{A}_{\dot{N}} &= E_{MAX} \cdot (\cos \alpha_{\dot{A}} + 120^\circ), \end{aligned} \quad (1.1)$$

где E_{MAX} – максимальное действующее значение ЭДС в фазе обмотки синхронизации, когда ее ось совпадает с осью обмотки возбуждения.

Если обмотки синхронизации СД и СП расположены относительно обмоток возбуждения одинаково ($\alpha_D = \alpha_{II}$), то ЭДС одноименных фаз сельсинов будут равны. Поскольку ЭДС направлены встречно, то в линии связи ЛС и в обмотках синхронизации ток будет отсутствовать. Такое положение роторов сельсинов называют согласованным.

Если ротор сельсина-датчика повернуть на некоторый угол $\alpha = \alpha_D - \alpha_{II}$, то равновесие ЭДС нарушится и по обмоткам синхронизации сельсинов будут протекать уравнивающие токи. В результате их взаимодействия с магнитными потоками обмоток возбуждения в СД и СП возникнут одинаковые по величине и встречно направленные электромагнитные синхронизирующие моменты, стремящиеся повернуть роторы в согласованное положение.

Так как ротор сельсина-датчика заторможен контролируемым механизмом, то в согласованное положение будет поворачиваться ротор сельсина-приемника, отрабатывая угол поворота ротора сельсина-датчика.

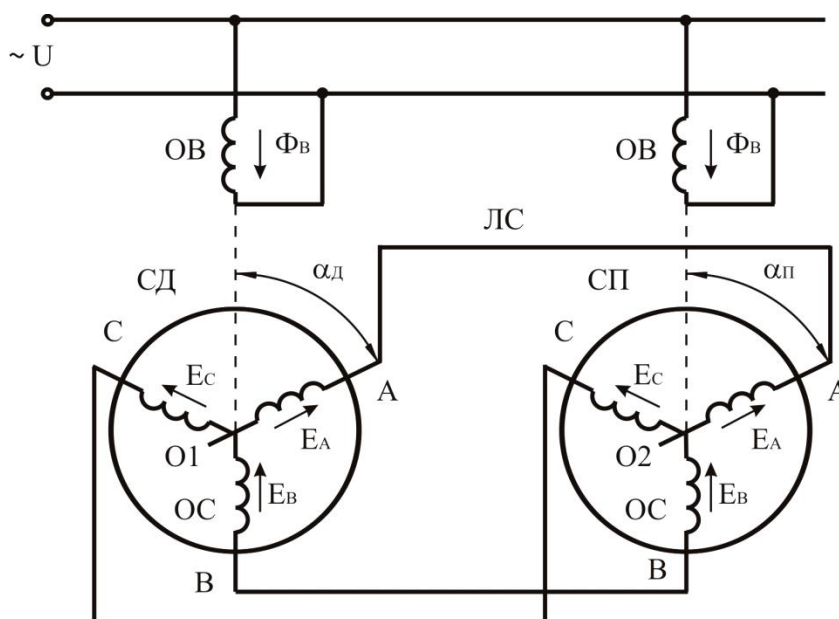


Рисунок 1.4 – Принципиальная схема включения сельсинов в индикаторном режиме

Трансформаторный режим работы сельсинов применяют в тех случаях, когда на ведомой оси приложен значительный тормозной момент, то есть когда приходится осуществлять поворот какого-либо механизма. В этом смысле трансформаторный режим называют режимом дистанционного управления, а индикаторный – режимом дистанционного контроля.

Обмотка возбуждения ОВ сельсина-датчика СД (рис. 1.5), механически связанного с ведущей осью O_1 , подключена к сети, а обмотка возбуждения ОВ сельсина-приемника СП подключена через усилитель У к обмотке управления исполнительного двигателя ИД. Последний поворачивает ведомую ось O_2 совместно с осью ротора сельсина-приемника. Обмотки синхронизации ОС сельсинов соединены линией связи ЛС.

Переменный ток, протекающий по обмотке возбуждения СД, создает в нем пульсирующий магнитный поток, который индуцирует ЭДС в трех фазах обмотки синхронизации СД. В результате по обмоткам синхронизации СД и СП будут протекать токи. Последние также создают в сельсине-приемнике пульсирующий магнитный поток, направление которого зависит от взаимного расположения роторов СД и СП. Магнитный поток ротора сельсина-приемника индуцирует в обмотке возбуждения ЭДС:

$$\dot{A}_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}} = U_{\dot{A}\dot{O}\dot{O}} = E_{MAX} \cdot \cos \alpha . \quad (1.2)$$

Система синхронной связи работает так, что при повороте ротора сельсина-датчика на некоторый угол из согласованного положения на выходе обмотки возбуждения сельсина-приемника появится напряжение. Последнее через усилитель подается на обмотку управления исполнительного двигателя, который обрабатывает заданный датчиком угол, поворачивая ведомую ось O_2 и ротор СП в положение, при котором $U_{ВЫХ} = 0$.

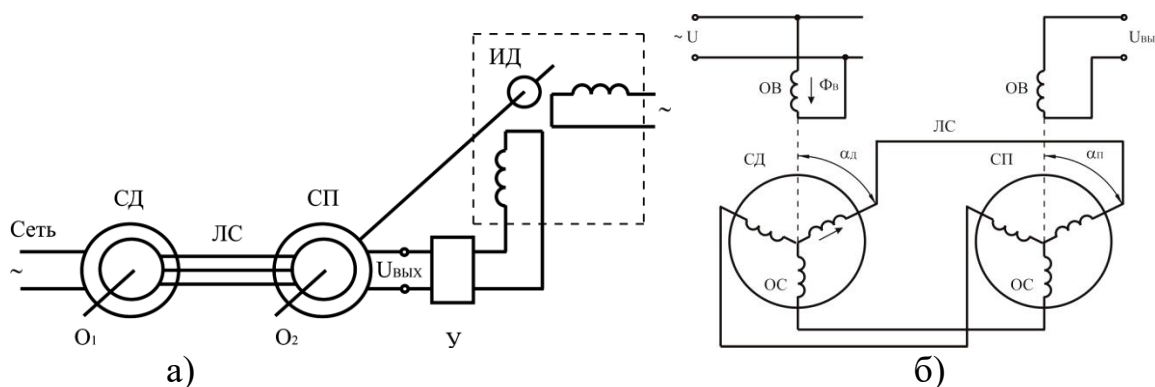


Рисунок 1.5 – Схема включения сельсинов в трансформаторном режиме:
а – принципиальная; б – соединения обмоток сельсинов

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Записать паспортные данные сельсинов в таблицу 1.1.

Таблица 1.1 – Паспортные данные сельсинов

Тип	$P_{НОМ}$, Вт	$U_{НОМ}$, В	$I_{НОМ}$, А	Класс точности

2. Собрать электрическую схему для исследования сельсинов в индикаторном режиме (рис. 1.6) и после проверки ее преподавателем провести испытания.

Включить автоматический выключатель QF.

Проверить совпадение нулевых положений стрелок на шкалах сельсина-датчика и сельсина-приемника. Если требуемого совпадения нет, то его необходимо добиться.

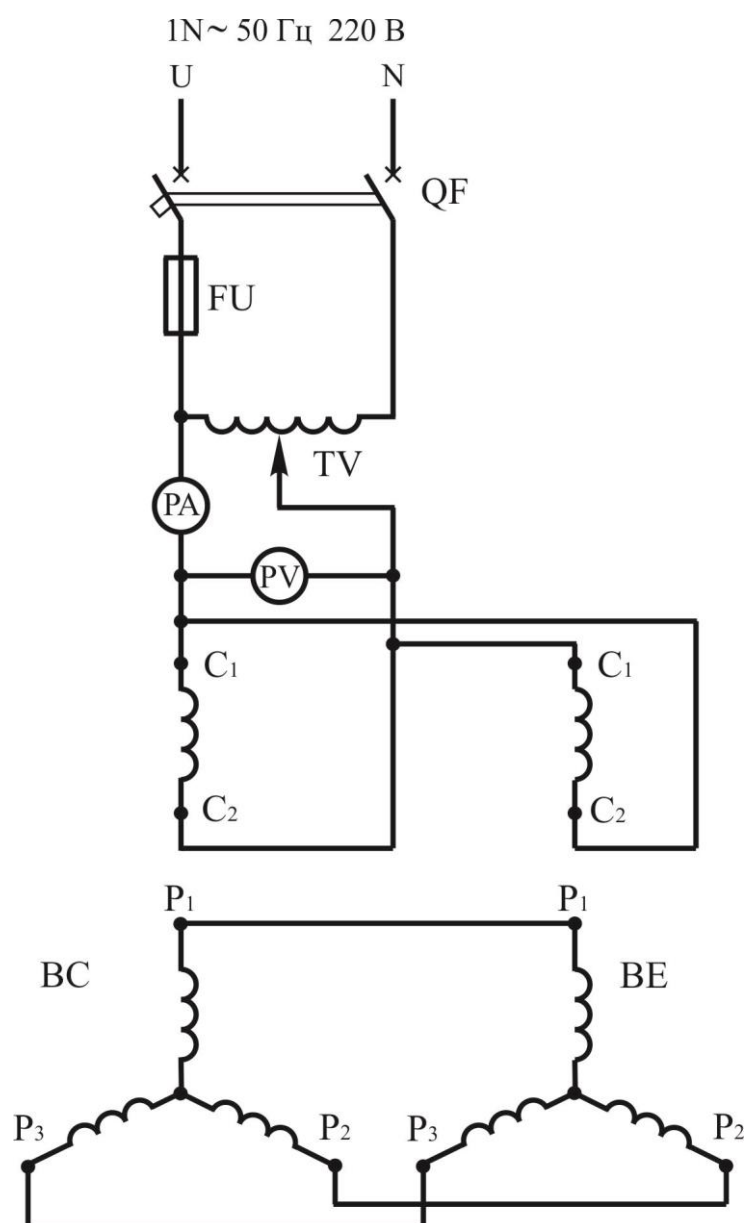


Рисунок 1.6 – Электрическая схема испытания сельсинов в индикаторном режиме

Поворачивая ротор сельсина-датчика через каждые 10° (всего полный оборот 360°), наблюдают за поворотом ротора сельсина-приёмника. Полученные данные занести в таблицу 1.2.

Определить угол рассогласования:

$$\alpha = \alpha_D - \alpha_P. \quad (1.3)$$

Полученные данные занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Данные опыта

По часовой стрелке						Против часовой стрелки					
$\alpha_D, ^\circ$	$\alpha_P, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\alpha_D, ^\circ$	$\alpha_P, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\alpha_D, ^\circ$	$\alpha_P, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$	$\alpha_D, ^\circ$	$\alpha_P, ^\circ$	$\alpha, ^\circ$
0			190			0			190		
10			200			10			200		
20			210			20			210		
30			220			30			220		
40			230			40			230		
50			240			50			240		
60			250			60			250		
70			260			70			260		
80			270			80			270		
90			280			90			280		
100			290			100			290		
110			300			110			300		
120			310			120			310		
130			320			130			320		
140			330			140			330		
150			340			150			340		
160			350			160			350		
170			360			170			360		
180						180					

По данным таблицы 1.2 построить графики зависимости углов рассогласования от углов поворота ротора сельсина-датчика по часовой стрелке и против часовой стрелки $\alpha = f(\alpha_D)$.

Определить класс точности сельсина по погрешности $\Delta\alpha$, которая определяется полусуммой максимальных значений положительного α_{MAX1} и отрицательного α_{MAX2} углов рассогласования за один оборот:

$$\Delta\alpha = 0,5 \cdot (\alpha_{MAX1} + \alpha_{MAX2}). \quad (1.4)$$

Сельсины в индикаторном режиме разделяются на три класса точности:

- первый класс $\Delta\alpha = 0...0,75^\circ$.
- второй класс $\Delta\alpha = 0,76^\circ... 1,50^\circ$.
- третий класс $\Delta\alpha = 1,51...2,50^\circ$.

3. Собрать электрическую схему для исследования сельсинов в трансформаторном режиме (рис. 1.7) и после проверки ее преподавателем провести испытания.

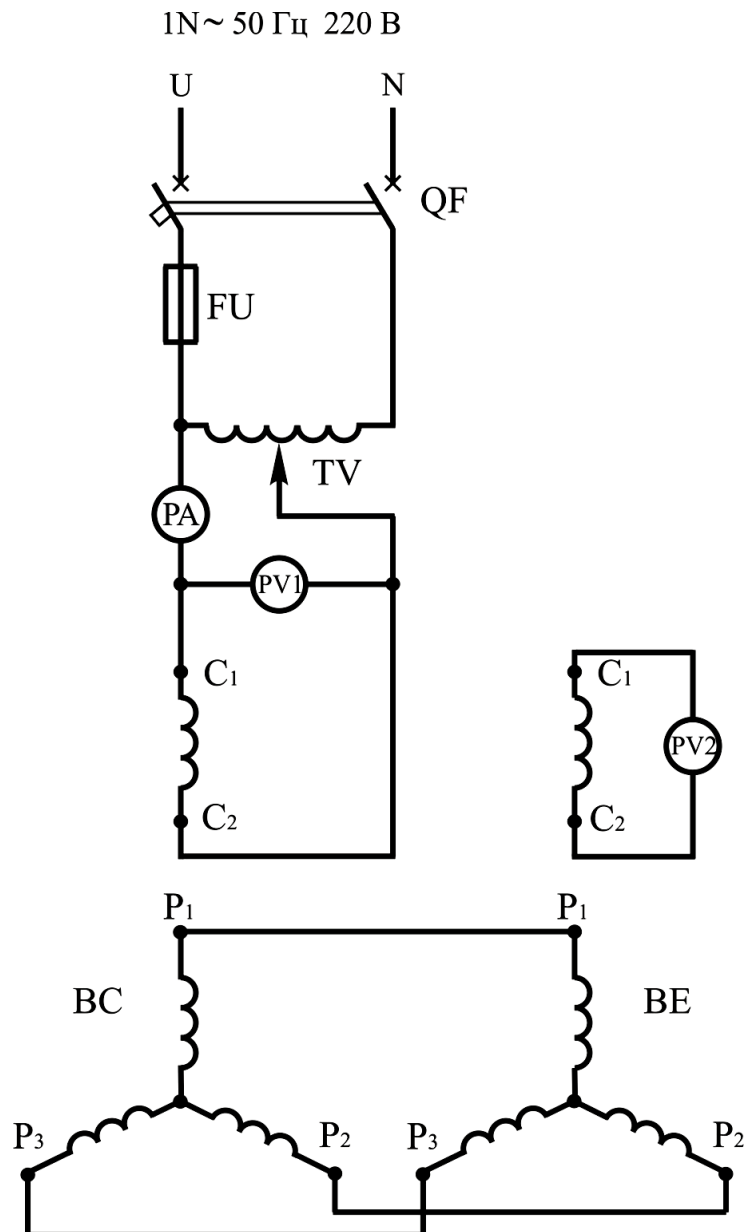


Рисунок 1.7 – Электрическая схема испытания сельсинов в трансформаторном режиме

Включить автоматический выключатель QF.

При заторможенном роторе сельсина-датчика поворотом ротора сельсина-приемника добиться наименьшего выходного напряжения PV2. Это положение ротора принять за исходное. Поворачивая ротор сельсина-приемника от 0° до 180° , через каждые 20° записать показания приборов в таблицу 1.3.

По данным таблицы 1.3 построить графики зависимости выходного напряжения и тока от угла поворота сельсина-приемника $U_{\text{ВЫХ}}, I_B = f(\alpha_{\text{П}})$

4. Оформить отчет по работе.

Таблица 1.3 – Данные опыта

$\alpha_{II}, ^\circ$	0	20	40	60	80	100	120	140	160	180
$U_{ВЫХ}, В$										
$I_B, А$										

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТ

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические схемы работы сельсинов в индикаторном и трансформаторном режимах.
3. Результаты проведенных опытов и построенные зависимости.
4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
5. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что называется индикаторной системой передачи?
2. Каков принцип работы сельсинов в индикаторном режиме?
3. Каков принцип работы сельсинов в трансформаторном режиме?
4. Какие факторы влияют на точность сельсинов?
5. Назначение и области применения сельсинов.
6. Способы устранения погрешности сельсинов.
7. Какие конструкции однофазных сельсинов вы знаете?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 2 ТАХОГЕНЕРАТОР ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы:

Ознакомиться с принципом действия и конструкцией тахогенератора постоянного тока, изучить требования, предъявляемые к тахогенераторам. Снять и построить выходные характеристики тахогенератора при холостом ходе и при нагрузке, зависимость выходного напряжения от сопротивления нагрузки.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить конструкцию и принцип работы тахогенератора постоянного тока.
2. Собрать электрическую схему.
3. Провести необходимые измерения.
4. Выполнить расчеты, построить графики.
5. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Тахогенераторами называют электрические микромашины, работающие в генераторном режиме и предназначенные для измерения частоты вращения по величине выходного напряжения, а также для преобразования частоты вращения в пропорциональный электрический сигнал.

Возбуждение тахогенераторов происходит или от постоянных магнитов (рис. 2.1, а), или от обмотки возбуждения, размещенной на полюсах статора и питаемой от независимого источника постоянного тока (рис. 2.1, б). Тахогенераторы могут иметь якорь барабанного типа с обмоткой, а также полый или дисковый якорь с печатной обмоткой.

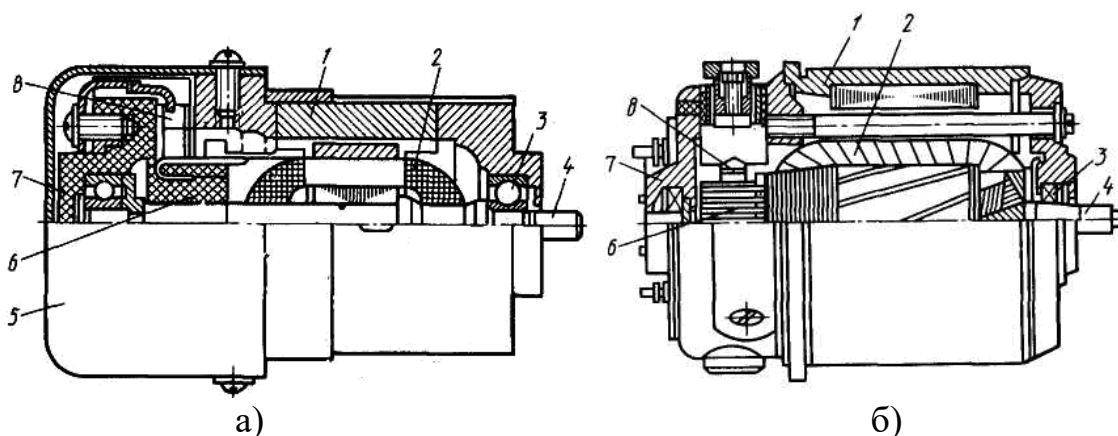


Рисунок 2.1 – Устройство тахогенератора постоянного тока:
 а) с постоянными магнитами; б) с электромагнитным возбуждением
 1 – корпус с полюсами; 2 – якорь; 3 – подшипник; 4 – вал; 5 – кожух;
 6 – коллектор; 7 – подшипниковый щит; 8 – щетки.

Тахогенераторы используют в качестве указателей частоты вращения при ее измерении, а так же, как датчик частоты вращения в системах автоматического регулирования и управления. Они могут быть использованы и для измерения угловых ускорений.

Принцип действия. При неизменном токе возбуждения I_a , то есть при неизменном потоке Φ , ЭДС пропорциональна частоте вращения, что является основой для использования машины постоянного тока в качестве тахогенератора:

$$E = c_e \cdot \Phi \cdot n, \quad (2.1)$$

где c_e – постоянный коэффициент по ЭДС, определяемый конструктивными параметрами машины и не зависящий от режимов ее работы.

Выходное напряжение тахогенератора:

$$U = \frac{E}{1 + \sum \frac{R_a}{R_{НАГР}}} = \frac{c_e \cdot \Phi \cdot n}{1 + \sum \frac{R_a}{R_{НАГР}}}, \quad (2.2)$$

где $R_{НАГР}$ – сопротивление нагрузки; R_a – сопротивление цепи якоря.

На рисунке (рис. 2.2, а) сплошными линиями показаны выходные характеристики для различных сопротивлений нагрузки при идеализированных условиях (при $\Phi = \text{const}$ и $\Sigma R_a = \text{const}$). Эти характеристики являются линейными, а их угол наклона к оси абсцисс уменьшается при снижении сопротивления нагрузки. Следовательно, тахогенераторы можно применять только при неизменной нагрузке, то есть совместно с индикатором или другим устройством, на который рассчитан данный тахогенератор.

Крутизна выходной характеристики современных тахогенераторов постоянного тока $S = 3 \dots 100$ мВ/(об/мин) (меньшие значения относятся к тахогенераторам с постоянными магнитами). Наиболее распространены тахогенераторы с номинальной частотой вращения $n = 1500 \dots 3000$ об/мин.

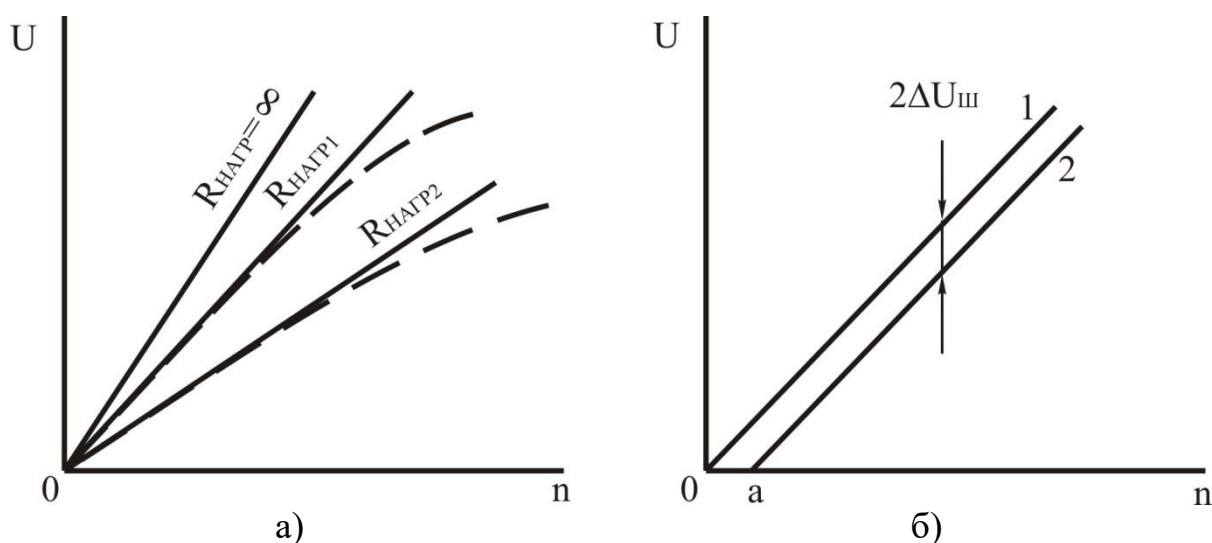


Рисунок 2.2 – Выходные характеристики тахогенератора постоянного тока (а) и влияние на характеристики падения напряжения под щетками (б)

Выходная характеристика практически отклоняется от линейного закона в результате погрешностей, а именно: размагничивающего действия реакции якоря; наличия нелинейного сопротивления в переходном контакте между коллекторным и щетками; изменения тока возбуждения из-за увеличения сопротивления обмотки возбуждения при ее нагревании.

Размагничивающее действие реакции якоря проявляется при возрастании частоты вращения n , так как при этом повышается напряжение U , увеличивается ток I_a тахогенератора, а, следовательно, и МДС якоря F_a . Поэтому при повышенных частотах вращения выходное напряжение U возрастает медленнее, чем увеличивается частота вращения (штриховые линии на рис. 2.2, а). Для уменьшения влияния размагничивающего действия реакции якоря в цепи нагрузки желательно иметь максимально большое сопротивление $R_{НАГР}$ и тахогенератор должен работать при небольших относительных частотах вращения.

Нелинейный характер сопротивления щеточного контакта также создает определенную погрешность по сравнению с идеализированной характеристикой 1 (рис. 2.2, б).

При этом выходная характеристика 2 остается линейной, однако в области малых частот вращения тахогенератор становится нечувствительным к изменению Δn – появляется зона нечувствительности 0а.

Нагревание обмоток возбуждения тахогенератора приводит к увеличению ее сопротивления R_B , вследствие чего уменьшаются ток возбуждения, магнитный поток и выходное напряжение. Чтобы с повышением температуры обмотки возбуждения ток возбуждения изменялся незначительно, последовательно с ней включают либо терморезистор, который стабилизирует сопротивление цепи обмотки возбуждения, либо добавочный резистор с сопротивлением $R_{ДОБ} \gg R_{НАГР}$, выполненный из металла с малым температурным коэффициентом сопротивления. Кроме того, для уменьшения влияния тока возбуждения на магнитный поток тахогенераторы часто выполняют с сильно насыщенной магнитной системой (рис. 2.3). При этом небольшие отклонения тока возбуждения ΔI_B от номинального, значения $I_{B.НОМ}$ практически не влияют на величину магнитного потока ($\Delta \Phi \cong 0$). В машине с сильно насыщенной магнитной системой уменьшается также размагничивающее действие реакции якоря, особенно при небольших токах нагрузки. Однако рост насыщения магнитной системы тахогенератора приводит к увеличению размеров его обмотки возбуждения, а, следовательно, размеров и массы всей машины. Недостатком насыщенной машины является также отсутствие пропорциональности между выходным напряжением и током возбуждения, что необходимо в некоторых схемах автоматики.

Указанные причины вызывают отклонение линейной выходной характеристики тахогенератора от идеализированной. Относительная скоростная амплитудная погрешность Δu , обусловленная нелинейностью выходной характеристики, обычно устанавливается при номинальной частоте вращения и определяется в процентах:

$$\Delta u = \left(\frac{U_{ИД} - U_D}{U_{ИД}} \right) \cdot 100, \quad (2.3)$$

где $U_{ИД}$ – выходное напряжение при идеализированных условиях; U_D – действительное значение выходного напряжения.

В тахогенераторах постоянного тока технологическая неточность установки щеток на геометрической нейтрали вызывает еще один вид погрешности – асимметрию выходного напряжения. Она заключается в том, что величина выходного напряжения различна при вращении якоря с одинаковой частотой, но в противоположных направлениях. Асимметрию выходного напряжения вычисляют как отношение разности выходных напряжений при вращении якоря с номинальной частотой в обоих направлениях к полусумме этих напряжений. В зависимости от класса

точности тахогенератора скоростная амплитудная погрешность при номинальной частоте вращения составляет $\pm (0,05 \div 3) \%$, а ошибка асимметрии равна $\pm (1 \div 3) \%$.

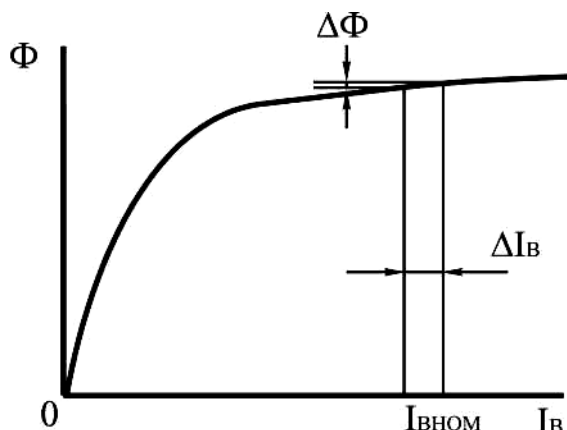


Рисунок 2.3 – Магнитная характеристика тахогенератора с насыщенной магнитной системой

Достоинства и недостатки тахогенераторов. Достоинства тахогенераторов постоянного тока следующие: малые габариты и масса при большой выходной мощности; отсутствие фазовой погрешности, что обусловлено работой на активную нагрузку; в тахогенераторах с постоянными магнитами не требуется иметь вспомогательный источник электрической энергии для возбуждения. Однако по сравнению с тахогенераторами переменного тока они имеют ряд недостатков: сложность конструкции, высокую стоимость, нестабильность выходной характеристики из-за наличия скользящего контакта, пульсации выходного напряжения и радиопомехи, возникающие в результате коммутации тока щетками.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Привести паспортные данные тахогенератора (табл. 2.1).

Таблица 2.1 – Паспортные данные тахогенератора постоянного тока

Тип	$P_{НОМ}$, Вт	$U_{НОМ}$, В	$I_{НОМ}$, А	$n_{НОМ}$, об/мин
ТМГ	20	230	0,087	4000

2. Собрать схему, привод тахогенератора осуществляется от коллекторной машины (рис. 2.4).

3. Снять выходную характеристику тахогенератора $U = f(n)$ при сопротивлении нагрузки $R_{НАГР} = \infty$, изменяя частоту от нуля до $n_{НОМ}$. Данные измерений занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Выходная характеристика тахогенератора $U = f(n)$ ($R_{НАГР} = \infty$)

U , В					
n , об/мин					

4. Снять выходную характеристику тахогенератора $U = f(n)$ при сопротивлении нагрузки $R_{НАГР} = 1 \text{ кОм}$, изменяя частоту от нуля до $n_{НОМ}$. Данные измерений занести в таблицу 2.3.

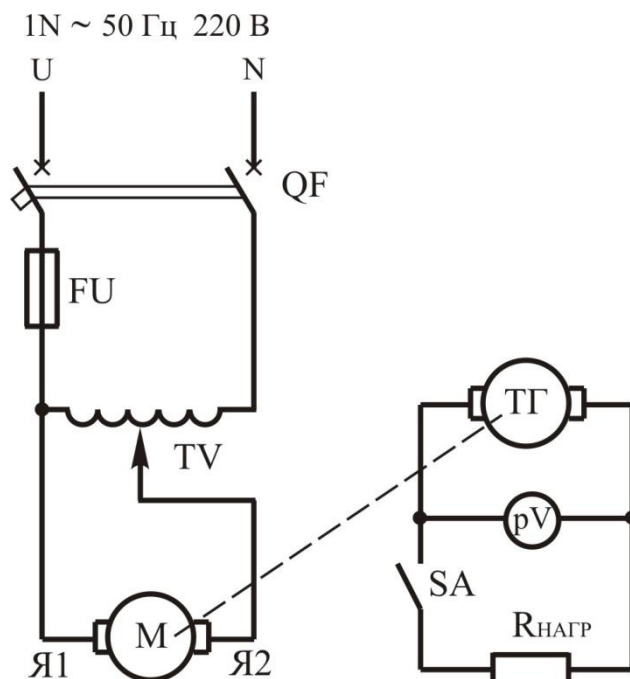


Рисунок 2.4 – Схема исследования тахогенератора постоянного тока

Таблица 2.3 – Выходная характеристика тахогенератора $U = f(n)$ ($R_{НАГР} = 1 \text{ кОм}$)

$U, \text{ В}$					
$n, \text{ об/мин}$					

5. Снять выходную характеристику тахогенератора $U = f(n)$ при сопротивлении нагрузки $R_{НАГР} = 4,5 \text{ кОм}$, изменяя частоту от нуля до $n_{НОМ}$. Данные измерений занести в таблицу 2.4.

Таблица 2.4 – Выходная характеристика тахогенератора $U = f(n)$ ($R_{НАГР} = 4,5 \text{ кОм}$)

$U, \text{ В}$					
$n, \text{ об/мин}$					

6. Построить на одном графике выходные характеристики тахогенератора $U = f(n)$ при сопротивлениях нагрузки $R_{НАГР} = \infty; 1 \text{ кОм}; 4,5 \text{ кОм}$.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Электрическая схема работы тахогенератора постоянного тока.
3. Результаты проведенных опытов, построенные графики.
4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
5. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Назначение тахогенератора постоянного тока.
2. Требования, предъявляемые к тахогенераторам постоянного тока.
3. Какие способы возбуждения тахогенераторов постоянного тока вы знаете?
4. Почему выходная характеристика тахогенератора криволинейна?
5. Что такое зона нечувствительности тахогенератора? Какие меры применяются для ее уменьшения?
6. Принцип действия тахогенератора постоянного тока.
7. Назовите причины погрешности выходной характеристики.
8. Что называют асимметрией выходного напряжения?
9. В чем преимущества тахогенератора постоянного тока?
10. Недостатки тахогенератора постоянного тока.
11. Область применения тахогенераторов постоянного тока.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3 ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ПОЛЕЗНОГО ДЕЙСТВИЯ ДВИГАТЕЛЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ МЕТОДОМ ХОЛОСТОГО ХОДА

Цель работы:

По данным опыта холостого хода двигателя постоянного тока параллельного возбуждения изучить виды потерь, определить коэффициент полезного действия.

Порядок выполнения работы:

1. Собрать электрические схемы.
2. Провести необходимые измерения.
3. Выполнить расчеты.
4. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В машинах постоянного тока, как и в других электрических машинах, имеют место магнитные, электрические, механические потери (составляющие группу основных потерь) и добавочные потери.

Магнитные потери ΔP_M возникают только в сердечнике якоря, так как только этот элемент магнитопровода машины постоянного тока подвергается перемагничиванию. Величина магнитных потерь, состоящих из потерь от гистерезиса и потерь от вихревых токов, зависит от частоты перемагничивания

$f = \frac{p \cdot n}{60}$, значений магнитной индукции в зубцах и

спинке якоря, толщины листов электротехнической стали, ее магнитных свойств и качества изоляции этих листов в пакете якоря.

Электрические потери в коллекторной машине постоянного тока обусловлены нагревом обмоток и щеточного контакта. Потери в цепи возбуждения определяются потерями в обмотке возбуждения и в реостате, включенном в цепь возбуждения:

$$\Delta P_{эл.в} = U_B \cdot I_B, \quad (3.1)$$

где U_B – напряжение на зажимах цепи возбуждения; I_B – ток возбуждения.

Потери в обмотках цепи якоря:

$$\Delta P_{эл.а} = I_a^2 \cdot \sum R_{а.пр}, \quad (3.2)$$

где I_a – ток якоря; $\sum R_{а.пр}$ – сопротивление обмоток в цепи якоря, приведенное к расчетной рабочей температуре двигателя $\theta_{РАСЧ}$.

$$\sum R_{а.пр} = \sum R_a \cdot (1 + 0,004 \cdot (\theta_{75} - \theta_{РАСЧ})), \quad (3.3)$$

где θ_{75} – рабочая температура двигателя по ГОСТ (75 °С); $\sum R_a$ – сопротивление обмоток в цепи якоря.

Аналогично к расчетной рабочей температуре двигателя приводится и сопротивления обмоток возбуждения.

Электрические потери в контакте щеток:

$$\Delta P_{эл.щ} = \Delta U_{щ} \cdot I_{щ}, \quad (3.4)$$

где $\Delta U_{щ}$ – переходное падение напряжения на щетках обеих полярностей, принимаемое в соответствии с маркой щеток (таблица 3.1), В; $I_{щ}$ – ток протекающий через щетки (принимается равным I_a).

Электрические потери в цепи якоря и в щеточном контакте зависят от нагрузки машины, поэтому эти потери называют переменными.

Механические потери в машине постоянного тока складываются из потерь от трения щеток о коллектор ΔP_K , от трения в подшипниках $\Delta P_{П}$ и потерь на вентиляцию $\Delta P_{ВЕН}$:

$$\Delta P_{МЕХ} = \Delta P_K + \Delta P_{П} + \Delta P_{ВЕН}, \quad (3.5)$$

$$\Delta P_K = k_{ТР} \cdot S_{щ} \cdot f_{щ} \cdot v_K, \quad (3.6)$$

где $k_{ТР}$ – коэффициент трения щеток о коллектор (0,2...0,3); $S_{щ}$ – поверхность соприкосновения всех щеток с коллектором, м²; $f_{щ}$ – удельное давление на щетки Н/м² (для машин общего назначения $(2...3) \cdot 10^4$ Н/м²); v_K – окружная скорость коллектора, м/с.

$$v_K = \frac{\pi \cdot D_K \cdot n}{60}, \text{ м/с}, \quad (3.7)$$

где D_K – диаметр коллектора, м; n – частоте вращения, об/мин.

Таблица 3.1 – Переходное падение напряжения на щётках

Группа щеток, обозначение	Переходное падение напряжения на пару щеток при номинальном токе, В	Номинальная плотность тока, А/мм ²	Область применения
Графитные Г	1,9...2,0	0,11...0,12	для машин с облегченными условиями коммутации
Электрографитированные ЭГ	2,0...2,7	0,10...0,15	для машин со средними и затрудненными условиями коммутации и для контактных колец
Угольнографитные Г	2,0	0,06...0,07	для машин со средними условиями коммутации
Металлографитные М, МГ	0,2...1,5	0,15...0,20	для низковольтных (до 48 В) машин и контактных колец

Механические и магнитные потери при стабильной частоте вращения ($n = \text{const}$) можно считать постоянными.

Сумма магнитных, механических и добавочных потерь составляет потери холостого хода (х.х.):

$$\Delta D_0 = \Delta D_l + \Delta D_{i\dot{a}0} + \Delta D_{\dot{a}\dot{a}} \quad (3.8)$$

Если машина работает в качестве двигателя параллельного возбуждения в режиме холостого хода, то она потребляет из сети мощность:

$$D_{10} = \sum \Delta D = \Delta D_l + \Delta D_{i\dot{a}0} + \Delta D_{\dot{a}} + I_{a0}^2 \cdot \sum R_a + \Delta U_{\dot{u}} \cdot I_{a0} + U_{\dot{a}} \cdot I_{\dot{a}}, \quad (3.9)$$

где I_{a0} – ток якоря при холостом ходе, А.

Однако ввиду небольшого значения тока I_{a0} электрические потери $I_{a0}^2 \cdot \sum R_a$ и $\Delta U_{\dot{u}} \cdot I_{a0}$ весьма малы и обычно не превышают 3 % потерь холостого хода. Поэтому, не допуская заметной ошибки, можно записать:

$$D_{10} = \Delta D_0 + U_{\dot{a}} \cdot I_{\dot{a}}, \quad (3.10)$$

откуда потери холостого хода:

$$\Delta P_0 = P_{10} - U_B \cdot I_B \quad (3.11)$$

Таким образом, потери холостого хода (магнитные, механические и добавочные) могут быть определены экспериментально.

В машинах постоянного тока имеется ряд трудно учитываемых потерь - добавочных. Эти потери складываются из потерь от вихревых токов в меди обмоток, потерь в уравнивательных соединениях, в стали якоря, из-за неравномерного распределения индукции при нагрузке, в полюсных наконечниках, обусловленных пульсацией основного потока вследствие зубчатого якоря и др. Добавочные потери составляют хотя и небольшую, но не поддающуюся точному учету величину. Поэтому, согласно ГОСТ 25941-

83, в машинах без компенсационной обмотки значение добавочных потерь ΔP_D принимают равным 1 % от отдаваемой (полезной) мощности для генераторов или 1 % от подводимой мощности для двигателей. В машинах с компенсационной обмоткой значение добавочных потерь принимают равным 0,5 %.

Мощность (Вт) на входе машины постоянного тока (подводимая мощность):

для генератора (механическая мощность)

$$P_{1ГЕН} = M_1 \cdot \omega = 0,105 \cdot M_1 \cdot n_1, \quad (3.12)$$

где M_1 – вращающий момент приводного двигателя, Н·м; ω – угловая скорость, рад/сек; n_1 – частота вращения приводного двигателя об/мин.

для двигателя (электрическая мощность)

$$P_{1ДВ} = U \cdot I, \quad (3.13)$$

где U – напряжение сети, В; I – ток, потребляемый из сети, А.

Мощность (Вт), отдаваемая на выходе машины (полезная мощность):

для генератора (электрическая мощность)

$$P_{2ГЕН} = U \cdot I, \quad (3.14)$$

для двигателя (механическая мощность)

$$P_{2ДВ} = 0,105 \cdot M_2 \cdot n_2, \quad (3.15)$$

где M_2 – момент на валу двигателя, Н·м; n_2 – частота вращения якоря, об/мин.

Коэффициент полезного действия электрической машины представляет собой отношение мощностей отдаваемой (полезной) P_2 к подводимой (потребляемой) P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}. \quad (3.16)$$

Определив суммарную мощность вышеперечисленных потерь, можно подсчитать КПД машины

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_M + \Delta P_{МЕХ} + \Delta P_D + \Delta P_{ЭЛ.а} + \Delta P_{ЭЛ.Щ} + \Delta P_{ЭЛ.В}, \quad (3.17)$$

$$\eta_{ГЕН} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I}{U \cdot I + \Sigma \Delta P}, \quad (3.18)$$

$$\eta_{ДВ} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{U \cdot I - \Sigma \Delta P}{U \cdot I}. \quad (3.19)$$

Обычно КПД машин постоянного тока составляет 0,75÷0,9 для машин мощностью от 1 до 100 кВт и 0,9÷0,97 для машин мощностью свыше 100 кВт. Намного меньше КПД машин постоянного тока малой мощности ($\eta = 0,15 \div 0,5$ для машин мощностью 5÷50 Вт). Указанные значения КПД соответствуют номинальной нагрузке машины. Зависимость КПД машины

постоянного тока от нагрузки выражается графиком $\eta = f(P_2)$, форма которого характерна для электрических машин (рис. 3.1).

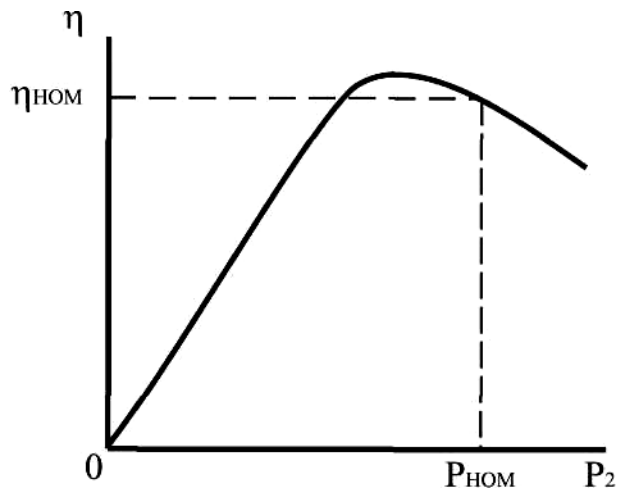


Рисунок 3.1 – Зависимость $\eta = f(P_2)$

Коэффициент полезного действия электрической машины можно определить:

- методом непосредственной нагрузки по результатам измерений подведенной P_1 и отдаваемой P_2 мощностей;
- косвенным методом по результатам измерений потерь.

Метод непосредственной нагрузки применим только для машин малой мощности, для остальных случаев применяется косвенный метод, как более точный и удобный. Установлено, что при $\eta > 80 \%$ пользоваться методом непосредственной нагрузки нецелесообразно, так как он дает большую ошибку, чем косвенный метод.

Существует несколько косвенных способов определения КПД. Наиболее распространен способ холостого хода двигателя, когда потребляемая машиной постоянного тока мощность затрачивается только на потери холостого хода. Что же касается электрических потерь, то их определяют расчетным путем после предварительного измерения электрических сопротивлений обмоток и приведения их к рабочей температуре.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Записать паспортные данные двигателя постоянного тока в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Паспортные данные двигателя постоянного тока

Марка двигателя	$P_{НОМ}$, кВт	$U_{НОМ}$, В	$I_{НОМ}$, А	η , %
П12	0,21	220	1,56	61

2. Измерить сопротивление обмоток.

Измерение сопротивления обмоток проводится по методу вольтметра и амперметра. Во избежание перегрева обмоток ток при измерении не должен превышать $0,5 \cdot I_{НОМ}$. Измерение сопротивления производят при трех значениях тока. При этом следует следить за тем, чтобы якорь не вращался, так как возникающая при этом ЭДС исказит результаты измерений.

Как известно, сопротивление проводников зависит от температуры. Так как измерение сопротивления ведется при относительно малых токах, то считается, что температура обмотки равна температуре окружающей среды. Согласно ГОСТ 25941-83 рабочей температурой для электрической машины считается температура $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, к которой и должно быть приведено сопротивление R_t , измеренное при какой-то другой температуре t , $^{\circ}\text{C}$. Сопротивление обмоток, изготовленных из меди, может быть приведено по формуле 3.3.

2.1. Для измерения сопротивления обмотки якоря собрать схему (рис. 3.2). При трех разных значениях тока измерить значения напряжения. Данные занести в таблицу 3.3.

Таблица 3.3 – Данные для расчета сопротивления обмотки якоря

№	U , В	I , А	R_t , Ом	$R_{t_{CP}}$, Ом	$R_{ПП}$, Ом
1					
2					
3					

Рассчитать значения измеренных сопротивлений, используя формулу:

$$R_t = \frac{U}{I}, \text{ Ом.} \quad (3.20)$$

Найти среднее значение сопротивления обмотки якоря:

$$R_{t_{CP}} = \frac{R_1 + R_2 + R_3}{3}, \text{ Ом.} \quad (3.21)$$

Привести полученное сопротивление к $75\text{ }^{\circ}\text{C}$ (форм. 3.3).

2.2. Для измерения сопротивления обмотки возбуждения собрать схему (рис. 3.3). При трех разных значениях тока измерить значения напряжения, произвести расчеты аналогично п. 2.1. Данные занести в таблицу 3.4.

Таблица 3.4 – Данные для расчета сопротивления обмотки возбуждения

№	U , В	I , А	R_t , Ом	$R_{t_{CP}}$, Ом	$R_{ПП}$, Ом
1					
2					
3					

3. Собрать схему опыта холостого хода (рис. 3.4).

Постепенно увеличивая напряжение, довести его до 220 В. Записать показания амперметров РА1 и РА2. Данные занести в таблицу 3.5.

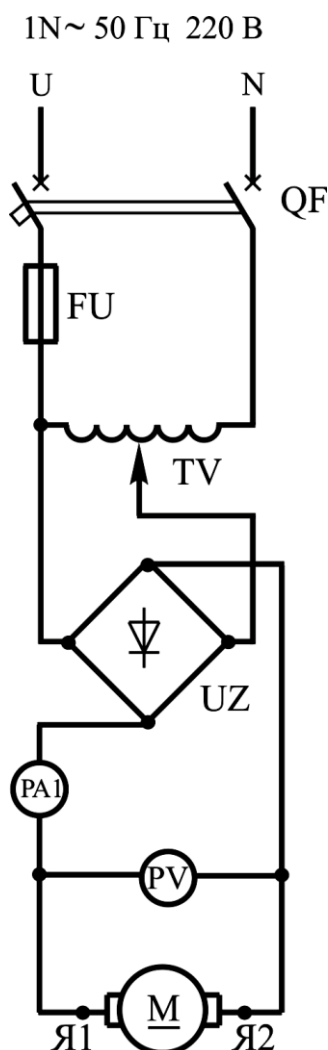


Рисунок 3.2 – Схема измерения сопротивления обмотки якоря

Таблица 3.5 – Данные опыта холостого хода

U, В	Показания амперметра РА1, А	Показания амперметра РА2, А

Рассчитать ток якоря в режиме холостого хода:

$$I_{a0} = I_0 - I_B. \quad (3.22)$$

Рассчитать потери холостого хода:

$$\Delta \mathcal{E}_0 = \Delta \mathcal{E}_I + \Delta \mathcal{E}_{\dot{I}\dot{A}\dot{O}} + \Delta \mathcal{E}_{\dot{A}\dot{A}} = U \cdot I_{a0}. \quad (3.23)$$

Рассчитать электрические потери в цепи возбуждения, электрические потери в цепи якоря, электрические потери в контакте щеток, определить суммарные потери (формула 3.9).

Рассчитать КПД двигателя при номинальной нагрузке, сравнить с паспортными данными:

$$\eta = \frac{D_{\text{нн}}}{D_{\text{нн}} + \sum \Delta D}. \quad (3.24)$$

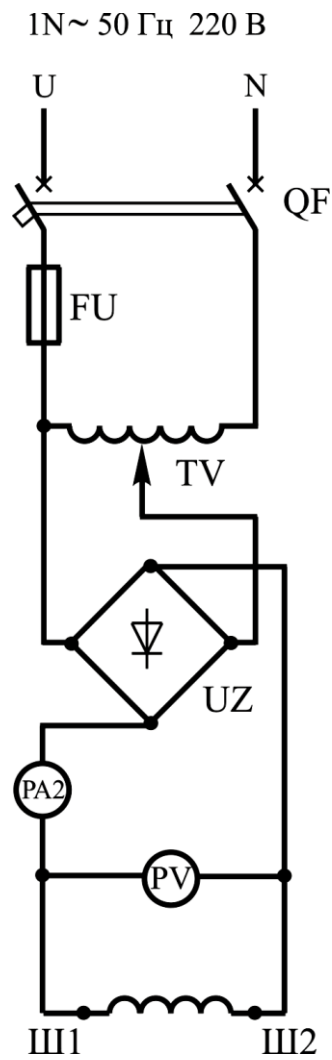


Рисунок 3.3 – Схема измерения сопротивления обмотки возбуждения

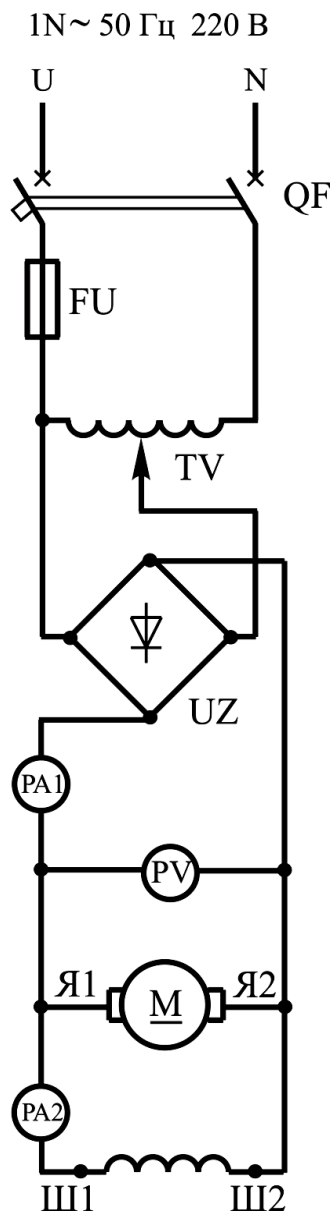


Рисунок 3.4 – Схема опыта холостого хода двигателя постоянного тока параллельного возбуждения

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические схемы испытания двигателя постоянного тока.
3. Результаты проведенных опытов.
4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
5. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие виды потерь в машинах постоянного тока вы знаете?
2. Чем обусловлены магнитные потери и от чего они зависят?
3. Чем обусловлены электрические потери и от чего они зависят?
4. Чем обусловлены механические потери и от чего они зависят?

5. Чем обусловлены добавочные потери? Как они учитываются?
6. Какие потери при стабильной частоте вращения можно считать постоянными?
7. Чему равна мощность двигателя и генератора на входе и выходе?
8. Что такое КПД машины постоянного тока? Какие значения он имеет для двигателей постоянного тока?
9. Какие методы определения КПД электрической машины вы знаете?
10. В чем сущность используемого в данной работе метода определения КПД?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА ПАРАЛЛЕЛЬНОГО И СМЕШАННОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы:

Ознакомиться с методикой испытания генератора параллельного и смешанного возбуждения, измерить сопротивление в цепи якоря и сопротивления обмоток возбуждения методом амперметра и вольтметра, получить характеристики генератора параллельного и смешанного возбуждения.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить принцип работы генератора параллельного и смешанного возбуждения.
2. Собрать электрические схемы.
3. Провести необходимые измерения.
4. Выполнить расчеты и построить графики.
5. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В генераторе с параллельным возбуждением (рис. 4.1, а) обмотка возбуждения подсоединена через регулировочный реостат параллельно нагрузке. Следовательно, в данном случае используется принцип самовозбуждения, при котором обмотка возбуждения получает питание непосредственно от обмотки якоря генератора. Самовозбуждение генератора возможно только при выполнении определенных условий. Чтобы установить их, рассмотрим процесс изменения тока в контуре "обмотка возбуждения - обмотка якоря" в режиме холостого хода. Для рассматриваемого контура получим уравнение:

$$\dot{e} = i_A \cdot \sum R_B + L_B \cdot \frac{di_B}{dt}, \quad (4.1)$$

где e – мгновенное значение ЭДС в обмотке якоря; i_B – мгновенное значение тока возбуждения; $\sum R_B = R_B + R_{PB}$ – суммарное сопротивление цепи возбуждения генератора (сопротивлением $\sum R_a$ можно пренебречь, так как оно

значительно меньше ΣR_B); L_B – суммарная индуктивность обмоток возбуждения и якоря.

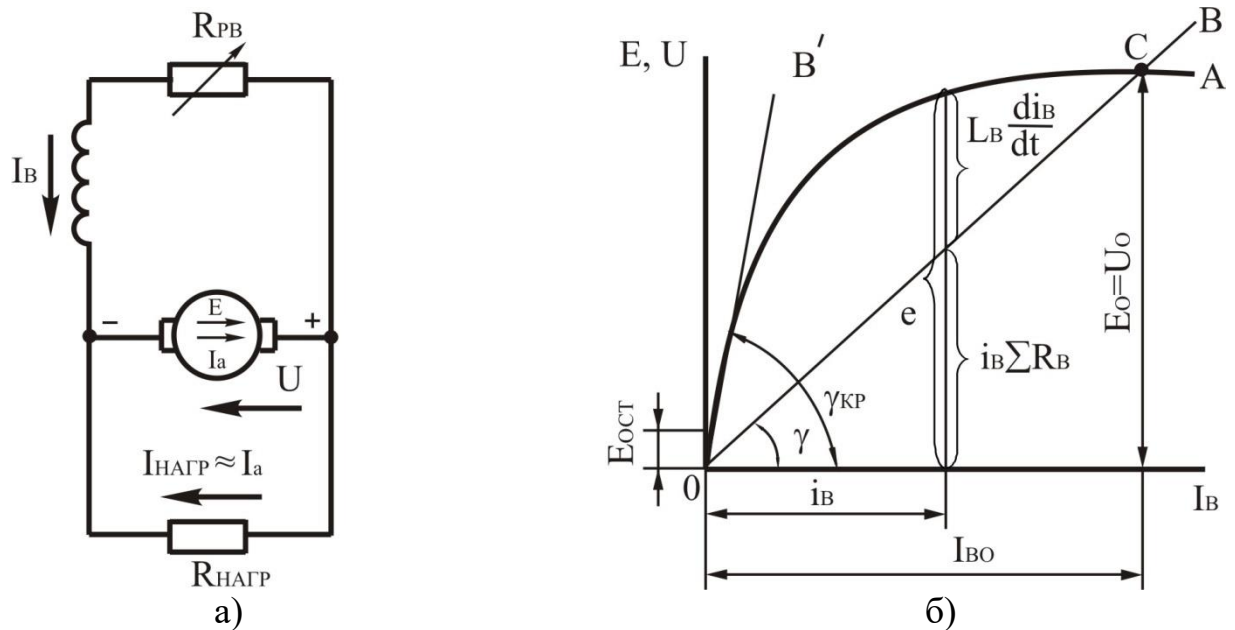


Рисунок 4.1 – Принципиальная схема генератора с параллельным возбуждением (а) и зависимости изменения ЭДС и падения напряжения в цепи возбуждения $i_B \cdot \Sigma R_B$ при изменении тока возбуждения генератора (б)

Все члены уравнения (4.1) можно изобразить графически (рис. 4.1, б). ЭДС e при некотором значении i_B тока возбуждения можно определить по характеристике ОА холостого хода генератора, а падение напряжения $i_B \cdot \Sigma R_B$ – по вольтамперной характеристике ОВ его цепи возбуждения. Характеристика ОВ представляет собой прямую, проходящую через начало координат под углом γ к оси абсцисс; при этом $tg \gamma = \Sigma R_B$. Из (4.1) имеем:

$$\frac{di_B}{dt} = \frac{e - i_B \cdot \Sigma R_B}{L_B}. \quad (4.2)$$

Следовательно, если разность $(e - i_B \cdot \Sigma R_B) > 0$, то производная $\frac{di_B}{dt} > 0$, и происходит процесс увеличения тока возбуждения i_B .

Установившийся режим в цепи обмотки возбуждения наблюдается при $\frac{di_B}{dt} = 0$, то есть в точке пересечения С характеристики холостого хода ОА с прямой ОВ. При этом машина работает с некоторым установившимся током возбуждения i_{B0} и ЭДС $E_0 = U_0$.

Из уравнения (4.2) следует, что для самовозбуждения генератора необходимо выполнение определенных условий:

- процесс самовозбуждения может начаться только в случае, если в начальный момент ($i_B = 0$) в обмотке якоря индуцируется некоторая

начальная ЭДС. Такая ЭДС может быть создана потоком остаточного магнетизма, который при вращении якоря индуцирует его в обмотке ЭДС $E_{ост}$. Обычно поток остаточного магнетизма имеется в машине из-за наличия гистерезиса в ее магнитной системе. Если такой поток отсутствует, то его создают, пропуская через обмотку возбуждения ток от постороннего источника;

- при прохождении тока i_B по обмотке возбуждения ее МДС F_B должна быть направлена согласно МДС остаточного магнетизма $F_{ост}$. В этом случае под действием разности $(e - i_B \cdot \Sigma R_B)$ происходит процесс нарастания тока i_B магнитного потока возбуждения F_B и ЭДС e . Если указанные МДС направлены встречно, то МДС обмотки возбуждения создает поток, направленный против потока остаточного магнетизма, машина размагничивается, и процесс самовозбуждения не сможет начаться;

- положительная разность $(e - i_B \cdot \Sigma R_B)$, необходимая для возрастания тока возбуждения i_B от нуля до установившегося значения i_{B0} , может возникать только в том случае, если в указанном диапазоне изменения тока i_B прямая ОВ располагается ниже характеристики холостого хода ОА. При увеличении сопротивления цепи возбуждения ΣR_B возрастает угол наклона γ прямой ОВ к оси тока I_B и при некотором критическом значении угла $\gamma_{кр}$ (соответствующем критическому значению сопротивления $\Sigma R_{B,кр}$) прямая ОВ практически совпадает с прямолинейной частью характеристики холостого хода. В этом случае $e \approx i_B \cdot \Sigma R_B$ и процесс самовозбуждения становится невозможным. Следовательно, для самовозбуждения генератора необходимо, чтобы сопротивление цепи возбуждения было меньше критического значения.

Если параметры цепи возбуждения подобраны так, что $\Sigma R_B \ll \Sigma R_{B,кр}$, то в точке С обеспечивается устойчивость режима самовозбуждения. При случайном уменьшении тока i_B ниже установившегося значения i_{B0} или увеличении его свыше i_{B0} возникает соответственно положительная или отрицательная разность $(e - i_B \cdot \Sigma R_B)$, стремящаяся изменить ток i_B так, чтобы он стал снова равным i_{B0} . Однако при $\Sigma R_B > \Sigma R_{B,кр}$ устойчивость режима самовозбуждения нарушается. Если в процессе работы генератора увеличить сопротивление цепи возбуждения ΣR_B до значения, большего $\Sigma R_{B,кр}$, то его магнитная система размагничивается и ЭДС уменьшается до $E_{ост}$. Если генератор начал работать при $\Sigma R_B > \Sigma R_{B,кр}$, то он не сможет самовозбудиться. Следовательно, условие $\Sigma R_B < \Sigma R_{B,кр}$ ограничивает возможный диапазон регулирования тока возбуждения генератора и его напряжения. Обычно можно уменьшить напряжение генератора, увеличивая сопротивление ΣR_B , лишь до $(0,6 \div 0,7) \cdot U_{ном}$.

Внешняя характеристика генератора представляет собой зависимость $U = f(I_{нагр})$ при $n = \text{const}$ и $R_B = \text{const}$ (рис. 4.2, кривая 1). Она располагается ниже внешней характеристики генератора с независимым возбуждением (кривая 2). Это объясняется тем, что в рассматриваемом генераторе, кроме

двух причин, вызывающих уменьшение напряжения с ростом нагрузки (падения напряжения в якоре и размагничивающего действия реакции якоря), существует еще третья причина – уменьшение тока возбуждения $I_B = \frac{U}{\sum R_B}$, который зависит от напряжения U , т. е. от тока $I_{НАГР}$.

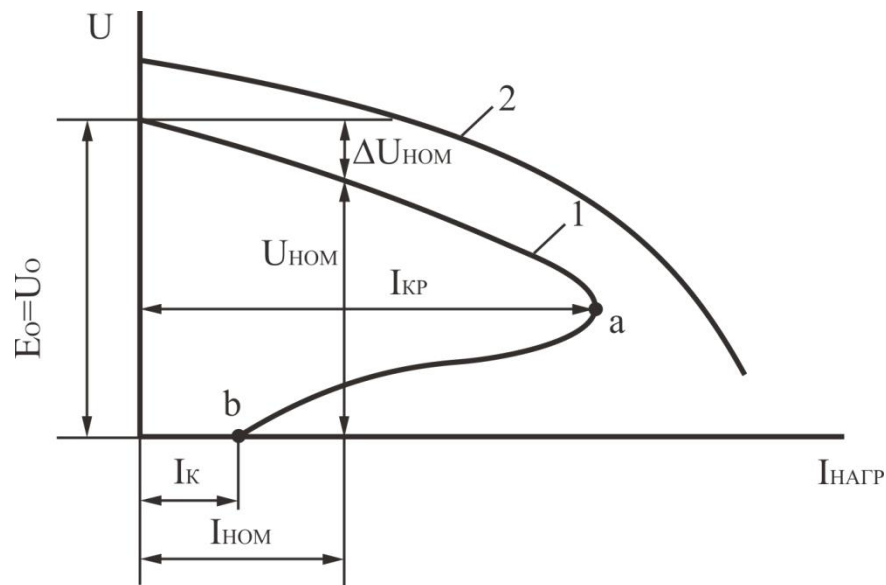


Рисунок 4.2 – Внешние характеристики генераторов с независимым (1) и параллельным (2) возбуждением

Генератор может быть нагружен только до некоторого максимального тока $I_{КР}$. При дальнейшем снижении сопротивления нагрузки $R_{НАГР}$ ток $I_B = \frac{U}{R_{НАГР}}$ начинает уменьшаться, так как напряжение U падает быстрее, чем уменьшается $R_{НАГР}$. Работа на участке ab внешней характеристики неустойчива; в этом случае машина переходит в режим работы, соответствующий точке b , то есть в режим короткого замыкания.

При переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода напряжение генератора изменяется на 10...20 %, то есть больше, чем в генераторе с независимым возбуждением.

При установившемся коротком замыкании якоря ток I_K генератора с параллельным возбуждением сравнительно мал (рис. 4.2), так как в этом режиме напряжение и ток возбуждения равны нулю. Следовательно, ток короткого замыкания создает только ЭДС от остаточного магнетизма и составляет $(0,4 \div 0,8) \cdot I_{НОМ}$.

Регулировочная и нагрузочная характеристики генератора с параллельным возбуждением имеют такой же характер, как и у генератора с независимым возбуждением.

Большинство генераторов постоянного тока, выпускаемых отечественной промышленностью, имеют параллельное возбуждение. Для улучшения внешней характеристики они обычно имеют небольшую

последовательную обмотку (один-три витка на полюс). При необходимости такие генераторы можно включать и по схеме с независимым возбуждением.

В генераторе с последовательным возбуждением (рис. 4.3, а) ток возбуждения $I_B = I_a = I_{НАГР}$. Внешнюю характеристику генератора (рис. 4.3, б, кривая 1) можно построить по характеристике холостого хода (кривая 2) и реактивному треугольнику АВС, стороны которого увеличиваются пропорционально току $I_{НАГР}$. При токах, меньших $I_{КР}$, с увеличением тока нагрузки возрастает магнитный поток Φ и ЭДС генератора E , вследствие чего увеличивается и его напряжение U . Только при больших токах $I_{НАГР} > I_{КР}$ напряжение U с возрастанием нагрузки уменьшается, так как в этом случае магнитная система машины насыщается и небольшое возрастание потока Φ не может компенсировать увеличение падения напряжения на внутреннем сопротивлении ΣR_a . Поскольку в генераторе с последовательным возбуждением напряжение сильно изменяется при изменении нагрузки, а при холостом ходе оно близко к нулю, такие генераторы непригодны для питания большинства электрических потребителей. Их используют лишь при электрическом торможении двигателей с последовательным возбуждением, которые при этом переводятся в генераторный режим.

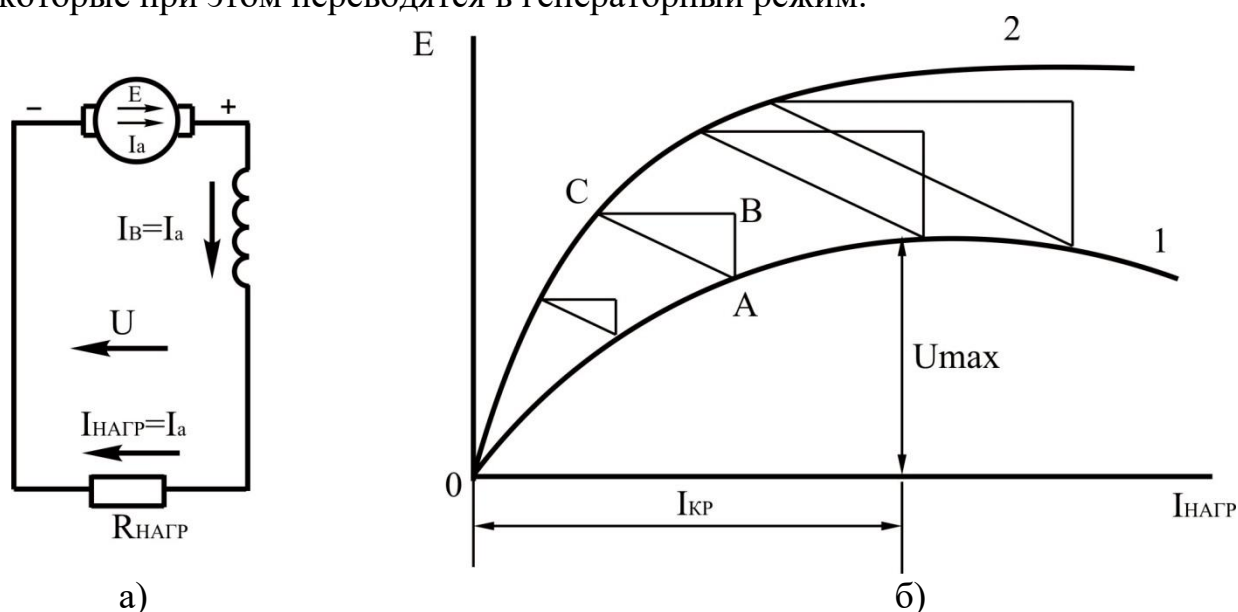


Рисунок 4.3 – Схема генератора с последовательным возбуждением (а) и его внешняя характеристика (б)

В генераторе со смешанным возбуждением (рис. 4.4, а) имеются две обмотки возбуждения: основная (параллельная) и вспомогательная (последовательная). Согласно включение двух обмоток позволяет получить приблизительно постоянное напряжение генератора при изменении нагрузки. Внешнюю характеристику генератора (рис. 4.4, б) в первом приближении можно представить в виде суммы характеристик, создаваемых каждой из обмоток возбуждения. При включении одной параллельной обмотки, по которой проходит ток возбуждения I_{B1} , напряжение генератора U постепенно уменьшается с увеличением тока нагрузки $I_{НАГР}$ (кривая 1). При включении

одной последовательной обмотки, по которой проходит ток возбуждения $I_{B2} = I_{НАГР}$, напряжение возрастает с увеличением тока $I_{НАГР}$ (кривая 2).

Подбирая число витков последовательной обмотки так, чтобы при номинальной нагрузке создаваемое ею напряжение $\Delta U_{ПОСЛ}$ компенсировало суммарное падение напряжения ΔU при работе машины с одной только параллельной обмоткой, можно добиться, чтобы напряжение U при изменении тока нагрузки от нуля до $I_{НОМ}$ оставалось почти неизменным (кривая 3). Практически оно изменяется в пределах $2 \div 3 \%$. Увеличивая число витков последовательной обмотки, можно получить характеристику, при которой напряжение $U_{НОМ} > U_0$ (кривая 4). Такая характеристика обеспечивает компенсацию падения напряжения не только во внутреннем сопротивлении ΣR_a генератора, но и в линии, соединяющей его с нагрузкой. Если последовательную обмотку включить так, чтобы МДС была направлена против МДС параллельной обмотки (встречное включение), то внешняя характеристика генератора при большом числе витков последовательной обмотки будет крутопадающей (кривая 5). Встречное включение последовательной и параллельной обмоток возбуждения применяют в сварочных генераторах и других специальных машинах, где требуется ограничить ток короткого замыкания.

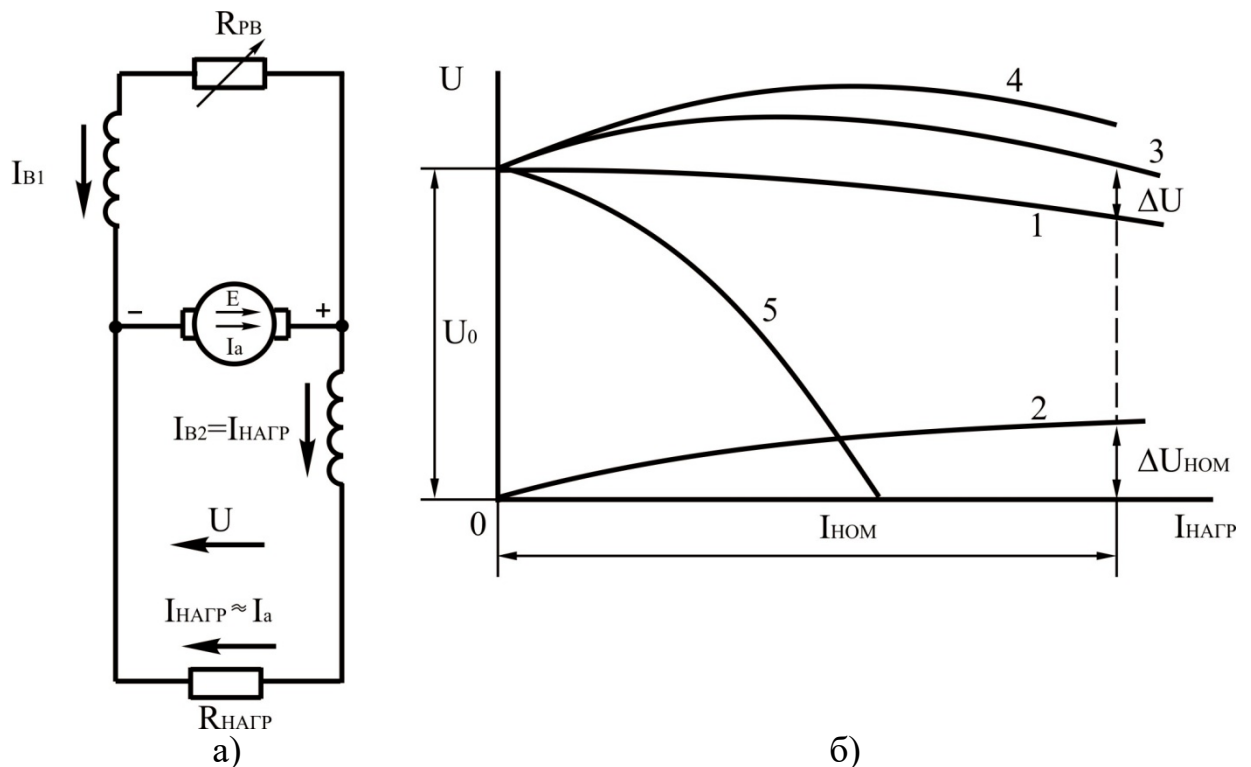


Рисунок 4.4 – Схема генератора со смешанным возбуждением (а) и его внешние характеристики (б)

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТ

1. Ознакомиться с установкой. Записать паспортные данные генератора (табл. 4.1).

Таблица 4.1 – Паспортные данные генератора

ТИП	$P_{НОМ}$, Вт	$U_{НОМ}$, В	$I_{НОМ}$, А	$n_{НОМ}$, об/мин
П-6	1500	220	8,65	1500

2. Ознакомиться с асинхронным двигателем, приводящим во вращение генератор.

3. Измерить сопротивление цепи якоря, параллельной и последовательной обмоток возбуждения генератора методом вольтметра и амперметра.

3.1. Для измерения сопротивления цепи якоря R_a собирают схему, приведенную на рис. 4.5.

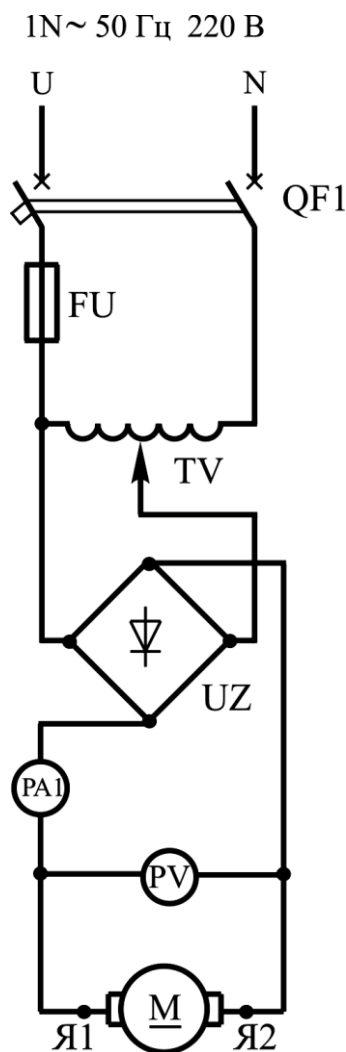


Рисунок 4.5 – Схема измерения сопротивления обмотки якоря

3.1.1. Включить автоматический выключатель QF1, убедившись, что регулятор напряжения выведен.

3.1.2. Изменяя значения тока в пределах от 0 до $0,5 \cdot I_{НОМ}$, снимают показания амперметра и вольтметра. Данные заносят в таблицу 4.2.

3.1.3. Рассчитывают значения сопротивлений, используя закон Ома:

$$R_t = \frac{U}{I}, \text{ Ом.} \quad (4.3)$$

Таблица 4.2 – Данные опыта

№	U, В	I, А	R _t , Ом	R _{t_{ср}} , Ом	R ₇₅ , Ом
1					
2					
3					
4					

3.1.4. Находим среднее значение сопротивления обмотки якоря:

$$R_{t_{ср}} = \frac{R_1 + \dots + R_n}{n}, \text{ Ом.} \quad (4.4)$$

3.1.5. Привести его к температуре 75 °С:

$$R_{75} = R_{t_{ср}} \cdot \frac{235 + 75}{235 + t}, \text{ Ом,} \quad (4.5)$$

где t – температура в помещении, °С.

Данные расчетов записать в таблицу 4.2.

3.1.6. Выключить автоматический выключатель QF1.

3.2. Для измерения сопротивления параллельной обмотки возбуждения собирают схему, приведенную на рис. 4.6.

3.2.1. Включить автоматический выключатель QF1, убедившись, что регулятор напряжения выведен.

3.2.2. Изменяя значения напряжения в пределах 0 до $U_{НОМ}$, снимают показания амперметра и вольтметра (опыт следует проводить по возможности быстро, так как обмотка нагревается, что влияет на величину измеряемого сопротивления). Данные записывают в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Данные опыта

№	U, В	I, А	R _t , Ом	R _{t_{ср}} , Ом	R ₇₅ , Ом
1					
2					
3					
4					

3.2.3. Выполнить расчеты аналогично п. 3.1.3.-3.1.5, результаты расчетов записать в таблицу 4.3.

3.2.4. Выключить автоматический выключатель QF1.

3.3. Для измерения сопротивления последовательной обмотки возбуждения собирают схему, приведенную на рис. 4.7.

3.3.1. Включить автоматический выключатель QF1, убедившись, что регулятор напряжения выведен.

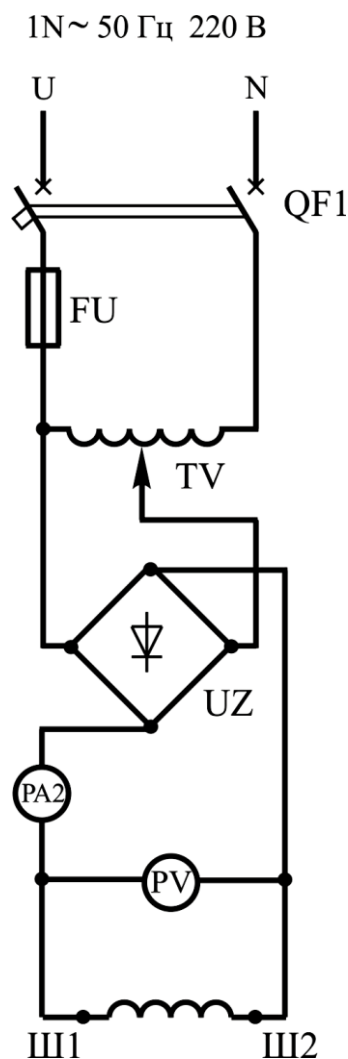


Рисунок 4.6 – Схема измерения сопротивления параллельной обмотки возбуждения

3.3.2. Изменяя значения тока в пределах от 0 до $0,5 \cdot I_{НОМ}$, снимают показания амперметра и вольтметра (опыт следует проводить по возможности быстро, так как обмотка нагревается, что влияет на величину измеряемого сопротивления). Данные записывают в таблицу 4.4.

3.3.3. Выполнить расчеты аналогично п. 3.1.3-3.1.5, результаты расчетов записать в таблицу 4.4.

Таблица 4.4 – Данные опыта

№	$U, В$	$I, А$	$R_t, Ом$	$R_{t_{ср}}, Ом$	$R_{75}, Ом$
1					
2					
3					
4					

3.3.4 Выключить автоматический выключатель QF1.

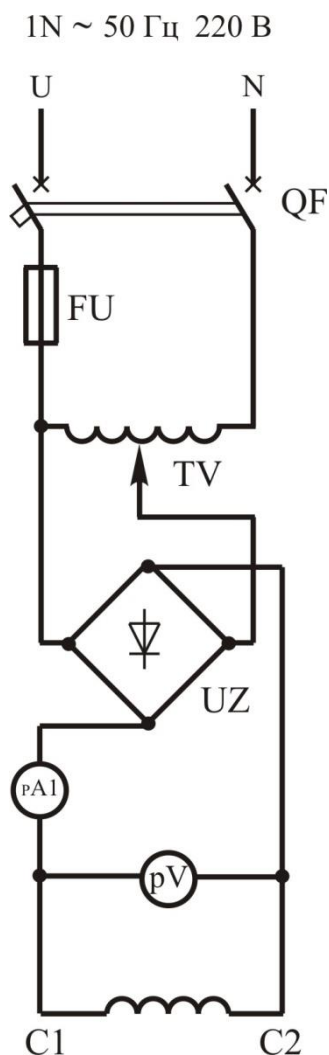


Рисунок 4.7 – Схема измерения сопротивления последовательной обмотки возбуждения

4. Собрать схему (рис. 4.8) для изучения генератора параллельного возбуждения.

4.1. Снять внешнюю характеристику генератора параллельного возбуждения – зависимость $U = f(I_{НАГР})$ при $R_B = \text{const}$.

4.1.1. Включить автоматический выключатель QF2, якорь генератора приводится во вращение (сопротивление нагрузки выведено, то есть SA1...SA4 выключены).

4.1.2. С помощью реостата R_B устанавливаем максимальное значение напряжения U .

4.1.3. Не изменяя положения реостата R_B в цепи возбуждения, постепенно нагрузить генератор (поочередно включая SA1...SA4). Результаты измерений занести в таблицу 4.5.

Таблица 4.5 – Данные опыта

$U, \text{В}$						
$I_{НАГР}, \text{А}$						
$I_B, \text{А}$						

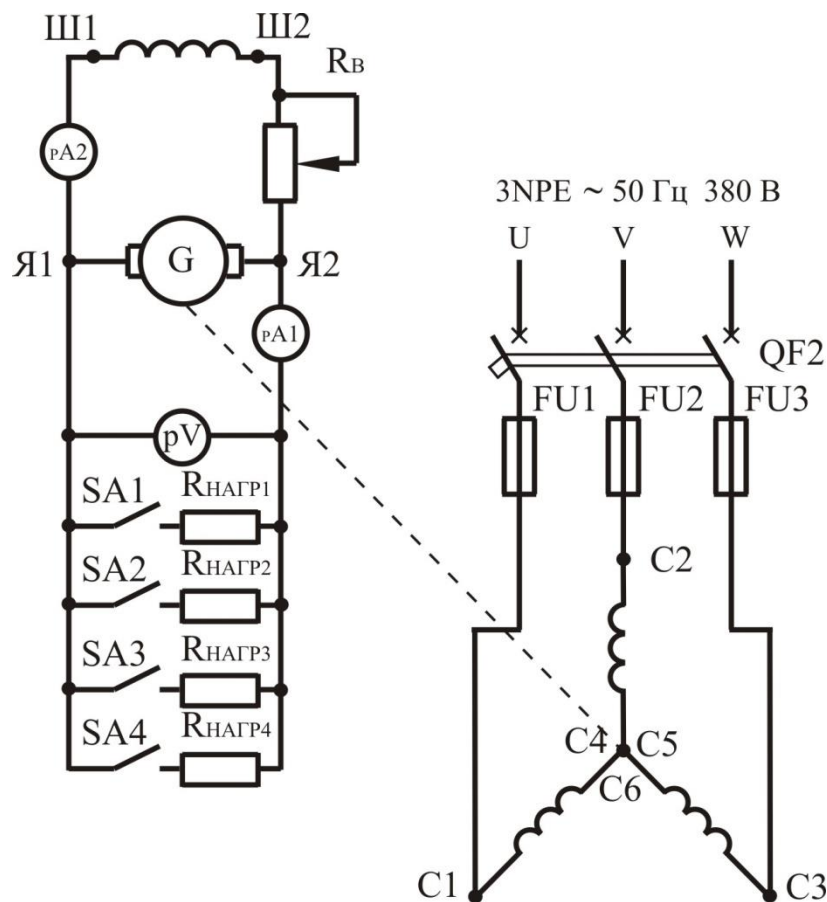


Рисунок 4.8 – Схема опыта для снятия характеристик генератора параллельного возбуждения

4.1.4. По полученной внешней характеристике определить процентное изменение напряжения:

$$\Delta U = \frac{(U_0 - U_{\hat{m}})}{U_{\hat{m}}} \cdot 100, \% \quad (4.6)$$

где U_0 – напряжение при холостом ходе; $U_{НОМ}$ – напряжение при номинальной нагрузке.

4.1.5. Выключить автоматический выключатель QF2

4.2. Снять регулировочную характеристику генератора параллельного возбуждения – зависимость $I_B = f(I_{НАГР})$ при $U = U_{НОМ} = \text{const}$.

4.2.1. Включить автоматический выключатель QF2, якорь генератора приводится во вращение (сопротивление нагрузки выведено, то есть SA1...SA4 выключены), установить минимальное напряжение U .

4.2.2. Увеличивая $I_{НАГР}$ (постепенно включая SA1...SA4), поддерживая постоянным установленное напряжение U , с помощью R_B снимают значения I_B и $I_{НАГР}$. Результаты измерений занести в таблицу 4.6.

4.2.3. По полученной регулировочной характеристике определить степень регулирования тока возбуждения ΔI_B :

$$\Delta I_B = \frac{(I_{\hat{A}. \hat{m}} - I_{BO})}{I_{B. \hat{m}}} \cdot 100, \% \quad (4.7)$$

где I_{BO} – ток возбуждения, создающий при холостом ходе номинальное напряжение генератора; $I_{B.HOM}$ – номинальный ток возбуждения, необходимый для установления номинального напряжения при номинальной нагрузке.

4.2.4. Выключить автоматический выключатель QF2.

Таблица 4.6 – Данные опыта

I_B, A						
$I_{НАГР}, A$						

5. Собрать схему (рис. 4.9).

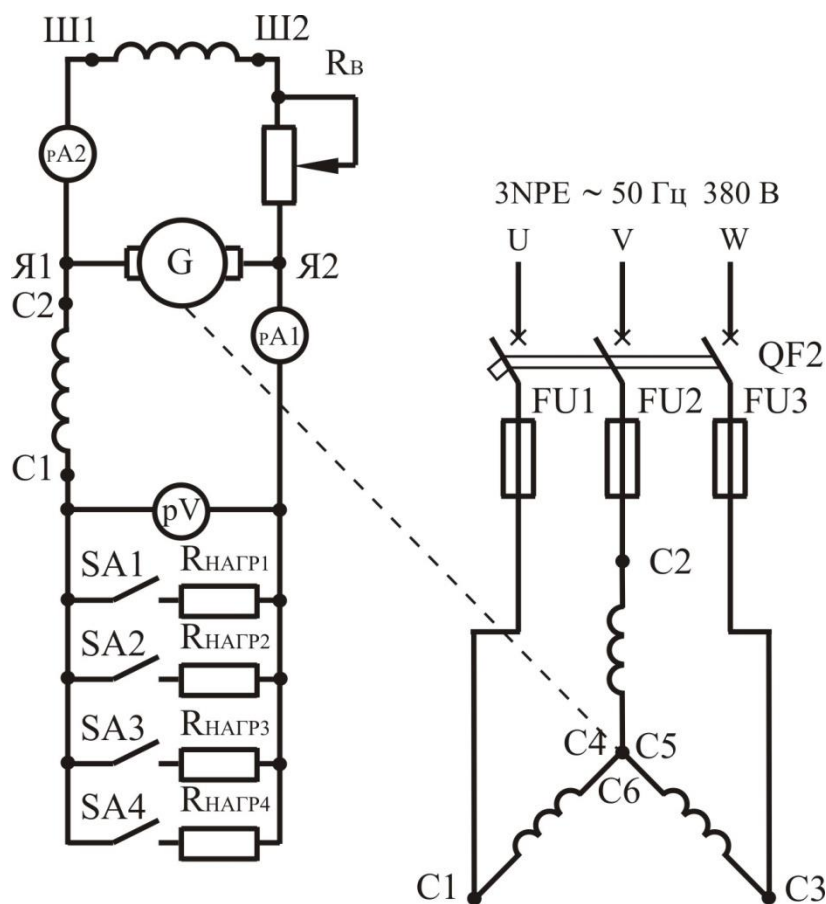


Рисунок 4.9 – Схема опыта для снятия характеристик генератора смешанного возбуждения при согласном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения

5.1. Снять внешнюю характеристику генератора смешанного возбуждения – зависимость $U = f(I_{НАГР})$ при $R_B = const$ – при согласном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения (C2-Ш1).

5.1.1. Включить автоматический выключатель QF2, якорь генератора приводится во вращение (сопротивление нагрузки выведено, то есть SA1...SA4 выключены).

5.1.2. С помощью реостата R_B устанавливаем максимальное значение напряжения U .

5.1.3. Не изменяя положения реостата R_B в цепи возбуждения, постепенно нагружают генератор (постепенно включая SA1...SA4). Результаты измерений занести в таблицу 4.7.

5.1.4. По полученной внешней характеристике определить процентное изменение напряжения (формула 4.6).

5.1.5. Выключить автоматический выключатель QF2.

Таблица 4.7 – Данные опыта

$U, В$						
$I_{НАГР}, А$						
$I_B, А$						

5.2. Снять регулировочную характеристику генератора смешанного возбуждения – зависимость $I_B = f(I_{НАГР})$ при $U = U_{НОМ} = \text{const}$, при согласном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения (С2-Ш1).

5.2.1. Включить автоматический выключатель QF2, якорь генератора приводится во вращение (сопротивление нагрузки выведено, то есть SA1...SA4 выключены), установить минимальное напряжение U .

5.2.2. Увеличивая $I_{НАГР}$ (постепенно включая SA1...SA4), поддерживая постоянным установленное напряжение U , с помощью R_B снимают значения I_B и $I_{НАГР}$. Результаты измерений занести в таблицу 4.8.

5.2.3. По полученной регулировочной характеристике определить степень регулирования тока возбуждения (формула 4.7).

5.2.4. Выключить автоматический выключатель QF2.

Таблица 4.8 – Данные опыта

$I_B, А$						
$I_{НАГР}, А$						

6. Собрать схему (рис. 4.10).

6.1. Снять внешнюю характеристику генератора смешанного возбуждения – зависимость $U = f(I_{НОМ})$ при $R_B = \text{const}$ при встречном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения (С1-Ш1).

6.1.1. Включить автоматический выключатель QF2, якорь генератора приводится во вращение (сопротивление нагрузки выведено, то есть SA1...SA4 выключены).

6.1.2. С помощью реостата R_B устанавливаем максимальное значение напряжения U .

6.1.3. Не изменяя положения реостата R_B в цепи возбуждения, постепенно нагружают генератор (постепенно включая SA1...SA4). Результаты измерений занести в таблицу 4.9.

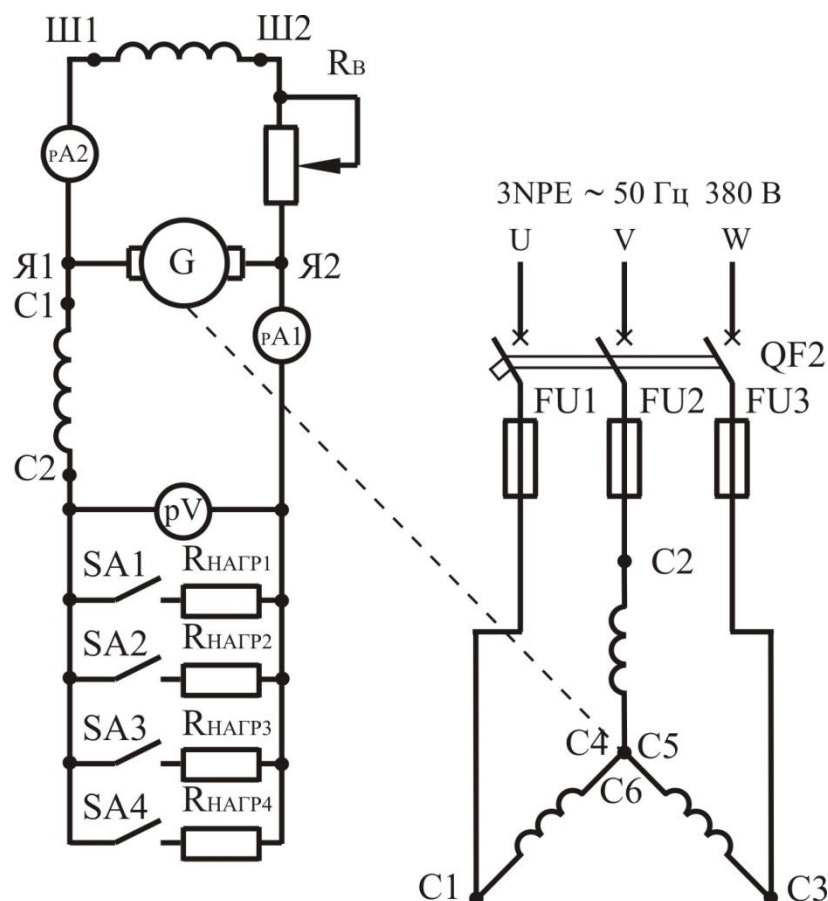


Рисунок 4.10 – Схема опыта для снятия внешних характеристик генератора смешанного возбуждения при встречном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения

Таблица 4.9 – Данные опыта

$U, В$						
$I_{НАГР}, А$						
$I_B, А$						

6.1.4. Выключить автоматический выключатель QF2.

6.1.5. По полученной внешней характеристике определить процентное изменение напряжения (формула 4.6).

6.2. Снять регулировочную характеристику генератора смешанного возбуждения – зависимость $I_B = f(I_{НАГР})$ при $U = U_{НОМ} = \text{const}$ при встречном включении последовательной и параллельной обмоток возбуждения (С1-Ш1).

6.2.1. Включить автоматический выключатель QF2, якорь генератора приводится во вращение (сопротивление нагрузки выведено, то есть SA1...SA4 выключены), установить минимальное напряжение U .

6.2.2. Увеличивая $I_{НАГР}$ (постепенно включая SA1...SA4), поддерживая постоянным установленное U , с помощью R_B снимают значения I_B и $I_{НАГР}$. Результаты измерений занести в таблицу 4.10.

6.2.3. Выключить автоматический выключатель QF2.

6.2.4. По полученной регулировочной характеристике определить степень регулирования тока возбуждения (формула 4.7).

Таблица 4.10 – Данные опыта

I_B, A						
$I_{НАГР}, A$						

По результатам опытов на одних координатных осях построить отдельно внешние и отдельно регулировочные характеристики.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические схемы испытания генератора постоянного тока.
3. Результаты проведенных опытов и построенные характеристики.
4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
5. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие характеристики определяют свойства генераторов параллельного, последовательного и смешанного возбуждения?
2. Что представляют собой нагрузочная, регулировочная и внешняя характеристики генератора параллельного возбуждения?
3. Что представляют собой нагрузочная, регулировочная и внешняя характеристика генератора смешанного возбуждения?
4. Почему нагрузочная характеристика генератора смешанного возбуждения при согласном включении обмоток может проходить или выше, или ниже характеристики холостого хода?
5. В каких устройствах применяется встречное включение параллельной и последовательной обмоток возбуждения и почему?
6. Назовите способы возбуждения генераторов постоянного тока. Назначение последовательной обмотки возбуждения в генераторе смешанного возбуждения?
7. Почему внешняя характеристика генератора параллельного возбуждения проходит ниже внешней характеристики генератора независимого возбуждения?
8. Какие основные причины приводят к уменьшению напряжения на зажимах генератора при увеличении его нагрузки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ГЕНЕРАТОРА НЕЗАВИСИМОГО ВОЗБУЖДЕНИЯ

Цель работы:

Приобрести практические навыки в сборке схем и опытным

исследовании генератора независимого возбуждения при снятии данных и построении основных характеристик, а также получить экспериментальное подтверждение теоретическим сведениям.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить принцип работы генератора независимого возбуждения.
2. Собрать электрические схемы.
3. Провести необходимые измерения.
4. Выполнить расчеты, построить графики.
5. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

В генераторе с независимым возбуждением (рис. 5.1) ток возбуждения I_B не зависит от тока якоря I_a , который равен току нагрузки $I_{НАГР}$. Ток I_B определяется только положением регулировочного реостата R_{PB} , включенного в цепь обмотки возбуждения:

$$I_B = \frac{U_B}{R_B + R_{PB}}, \text{ А,} \tag{5.1}$$

где U_B – напряжение источника питания; R_B – сопротивление обмотки возбуждения; R_{PB} – сопротивление регулировочного реостата.

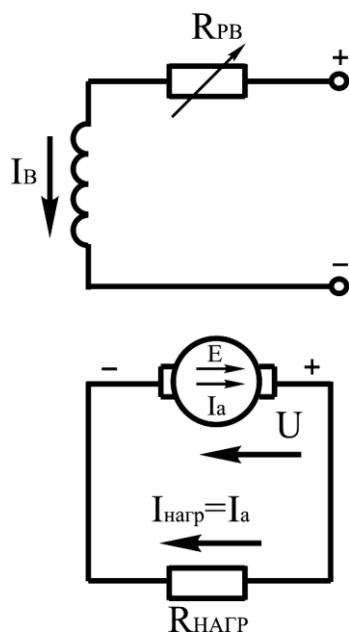


Рисунок 5.1 – Принципиальная схема генератора с независимым возбуждением

Обычно ток возбуждения невелик и составляет $1 \div 3 \%$ от номинального тока якоря. Основные характеристики, определяющие свойства генераторов постоянного тока, следующие: холостого хода; внешняя; короткого замыкания; нагрузочная; регулировочная.

Характеристикой холостого хода (рис. 5.2, а) называют зависимость $U_0 = f(I_B)$ при $I_{НАГР} = 0$ и $n = \text{const}$. При холостом ходе машины, когда цепь нагрузки разомкнута, напряжение U_0 на зажимах обмотки якоря равно ЭДС $E_0 = c_e \cdot \Phi \cdot n$. Частота вращения якоря поддерживается неизменной, и напряжение при холостом ходе зависит только от магнитного потока Φ , то есть тока возбуждения I_B . Поэтому характеристика $U_0 = f(I_B)$ подобна магнитной характеристике $\Phi = f(I_B)$. Характеристику холостого хода легко получить экспериментально. Для этого сначала устанавливают ток возбуждения таким, чтобы напряжение холостого хода $U_0 = 1,15 \cdot U_{НОМ}$, затем уменьшают ток возбуждения до нуля (нисходящая ветвь) и снова увеличивают его до прежнего значения (восходящая ветвь). Расхождение ветвей объясняется наличием гистерезиса в магнитопроводе машины. При $I_B = 0$ в обмотке якоря потоком остаточного магнетизма индуцируется остаточная ЭДС $E_{ОСТ}$, которая составляет 2÷4 % от $U_{НОМ}$.

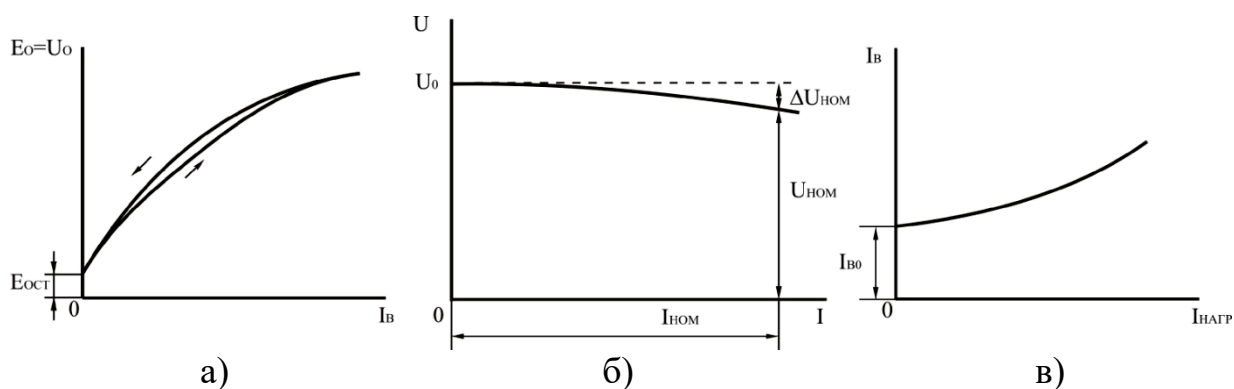


Рисунок 5.2 – Характеристики генератора с независимым возбуждением: холостого хода (а); внешняя (б); регулировочная (в)

Внешней характеристикой (рис. 5.2, б) называют зависимость $U = f(I_{НАГР})$ при $n = \text{const}$ и $I_B = \text{const}$. В режиме нагрузки напряжение генератора:

$$U = E - I_a \cdot \sum R_a, \text{ В}, \quad (5.2)$$

где $\sum R_a$ – сумма сопротивлений всех обмоток, включенных последовательно в цепь якоря (обмоток якоря, добавочных полюсов и компенсационной обмотки).

С увеличением нагрузки на уменьшение напряжения U влияют падение напряжения во внутреннем сопротивлении $I \cdot R_a$ машины и уменьшение ЭДС E в результате размагничивающего действия реакции якоря.

Изменение напряжения при переходе от режима номинальной нагрузки к режиму холостого хода определяется:

$$\Delta U = \frac{(U_0 - U_{\text{н}})}{U_{\text{н}}} \cdot 100, \%. \quad (5.3)$$

Для генераторов с независимым возбуждением оно составляет 5÷15%.

Регулировочной характеристикой (рис. 5.2, в) называют зависимость $I_B = f(I_{НАГР})$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$. Она показывает, каким образом следует регулировать ток возбуждения, чтобы поддерживать постоянным напряжение генератора при изменении нагрузки. Очевидно, что в этом случае по мере роста нагрузки нужно увеличивать ток возбуждения.

Характеристикой короткого замыкания (рис. 5.3) называют зависимость тока короткого замыкания от тока возбуждения ($I_K = f(I_B)$) при $U = 0$ и $n = \text{const}$.

Характеристика снимается при замыкании выходных зажимов цепи якоря генератора накоротко. Так как электродвижущая сила мала, машина не насыщена, и зависимость $I_K = f(I_B)$ практически линейна. При $I_B = 0$ из-за наличия остаточного магнитного потока ток $I_K \neq 0$ и в крупных машинах близок к номинальному току или даже больше его.

Характеристика короткого замыкания совместно с характеристикой холостого хода дает возможность определить реакцию якоря машины и построить характеристический треугольник. Он необходим для графического построения основных характеристик машины (внешней, регулировочной, нагрузочной), когда их нельзя получить путем непосредственной загрузки генератора из-за отсутствия источника энергии достаточной мощности и соответствующих нагрузочных сопротивлений.

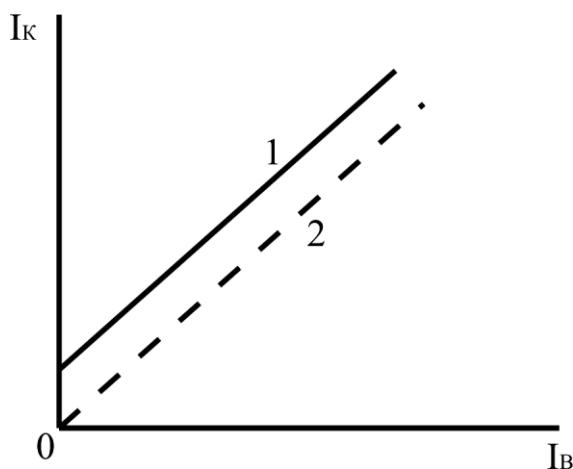


Рисунок 5.3 – Характеристика короткого замыкания

В размагниченной машине характеристика короткого замыкания начинается с нуля (кривая 2).

Нагрузочной характеристикой (рис. 5.4, а) называют зависимость $U = f(I_B)$ при $n = \text{const}$ и $I_{НАГР} = \text{const}$. Нагрузочная характеристика при $I_{НАГР} = I_{НОМ}$ (кривая 2) проходит ниже характеристики холостого хода (кривая 1), которую можно рассматривать как частный случай нагрузочной характеристики при $I_{НАГР} = 0$. Разность ординат кривых 1 и 2 обусловлена размагничивающим действием реакции якоря и падением напряжения во внутреннем сопротивлении ΣR_a машины.

Наглядное представление о влиянии этих факторов дает характеристический, или реактивный треугольник ABC. Если к отрезку aA,

равному в определенном масштабе напряжению U , при некотором токе нагрузки $I_{НАГР}$ и токе возбуждения I_B , прибавить отрезок АВ, равный в том же масштабе падению напряжения $I_B \cdot \Sigma R_a$ в генераторе, то получим отрезок аВ, равный ЭДС E .

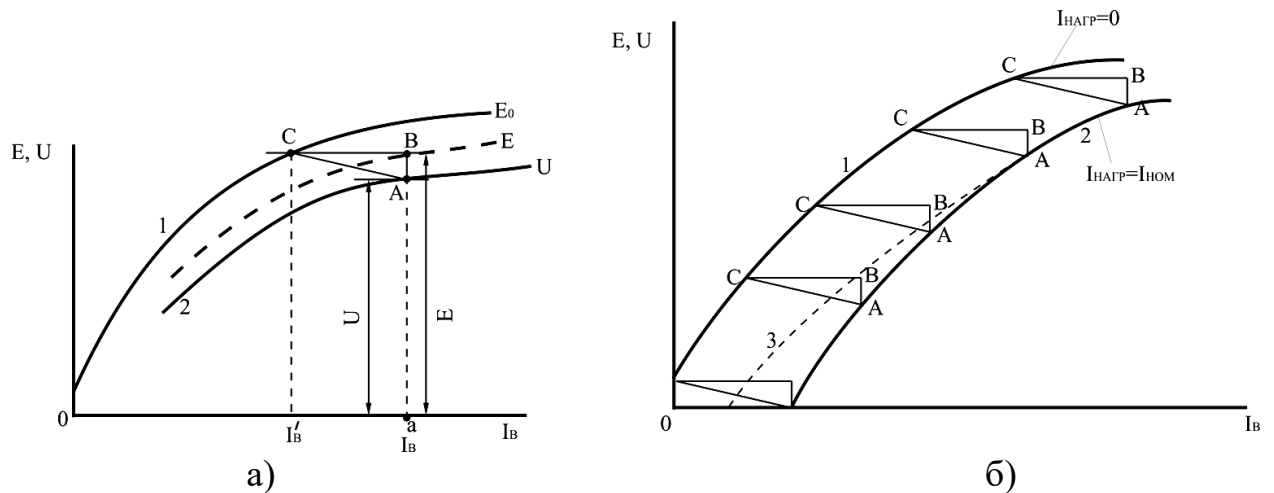


Рисунок 5.4 – Нагрузочная характеристика генератора с независимым возбуждением (а) и ее построение с помощью характеристического треугольника (б)

При холостом ходе ЭДС E индуцируется в обмотке якоря при меньшем токе I_B' , соответствующем абсциссе точки С. Следовательно отрезок ВС характеризует размагничивающее действие реакции якоря в масштабе тока возбуждения. При неизменном токе $I_{НАГР}$ катет АВ характеристического треугольника является постоянным; катет ВС зависит не только от тока $I_{НАГР}$, но и от степени насыщения магнитной системы, то есть от тока возбуждения I_B . Однако в ряде случаев влиянием тока возбуждения пренебрегают и принимают, что отрезок ВС пропорционален только току $I_{НОМ}$.

Такое допущение позволяет строить нагрузочные характеристики при разных токах, изменяя лишь длину всех сторон треугольника ABC. Если вершина С характеристического треугольника, построенного для некоторого тока $I_{НАГР}$, расположена на характеристике 1 холостого хода (рис. 5.4, б), а затем по этой характеристике перемещается треугольник ABC так, что катет ВС остается параллельным оси абсцисс, то след точки А изображает приближенно искомую нагрузочную характеристику 2 при заданном значении тока $I_{НАГР}$. Эта характеристика несколько отличается от реальной характеристики 3 (которая может быть снята опытным путем), так как величина катета ВС характеристического треугольника изменяется из-за изменения условий насыщения. Используя характеристику холостого хода с помощью характеристического треугольника, можно построить и другие характеристики генератора – внешнюю и регулировочную.

Достоинство генераторов с независимым возбуждением – возможность регулирования напряжения в широких пределах от нуля до $U_{МАХ}$ путем изменения тока возбуждения и сравнительно малое изменение напряжения

под нагрузкой. Однако для питания обмотки возбуждения таких генераторов требуются внешние источники постоянного тока.

Генераторы с независимым возбуждением используют только при большой мощности, а также при малой мощности, на низком напряжении. Независимо от значения напряжения на якоре обмотку возбуждения рассчитывают на стандартное напряжение постоянного тока 110 или 220 В для упрощения регулировочной аппаратуры.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с установкой. Записать паспортные данные генератора (табл. 5.1).

Таблица 5.1 – Паспортные данные генератора

ТИП	$P_{НОМ}$, Вт	$U_{НОМ}$, В	$I_{НОМ}$, А	$n_{НОМ}$, об/мин

2. Ознакомиться с асинхронным двигателем, приводящим во вращение генератор.

3. Измерить сопротивление цепи якоря и обмотки возбуждения генератора методом вольтметра и амперметра.

3.1. Для измерения сопротивления цепи якоря R_a собирают схему, приведенную на рисунке 5.5.

3.1.1. Включить автоматический выключатель QF1, убедившись, что регулятор напряжения выведен.

3.1.2. Изменяя значения тока в пределах от 0 до $0,5 \cdot I_{НОМ}$ снимают показания амперметра и вольтметра. Данные заносят в таблицу 5.2.

3.1.3. Рассчитывают значения сопротивлений используя закон Ома:

$$R_t = \frac{U}{I}, \text{ Ом.} \quad (5.4)$$

3.1.4. Находим среднее значение сопротивления обмотки якоря:

$$R_{t_{cp}} = \frac{R_1 + \dots + R_n}{n}, \text{ Ом.} \quad (5.5)$$

Таблица 5.2 – Данные опыта

№	U , В	I , А	R_t , Ом	$R_{t_{cp}}$, Ом	R_{75} , Ом
1					
2					
3					
4					

3.1.5. Привести его к температуре $75 \text{ }^\circ\text{C}$:

$$R_{75} = R_{t_{CP}} \cdot \frac{235 + 75}{235 + t}, \text{ Ом,} \quad (5.6)$$

где t – температура в помещении, °С.

Данные расчетов записать в таблицу 5.2.

3.1.6. Выключить автоматический выключатель QF1.

3.2. Для измерения сопротивления обмотки возбуждения собирают схему, приведенную на рисунке 5.6.

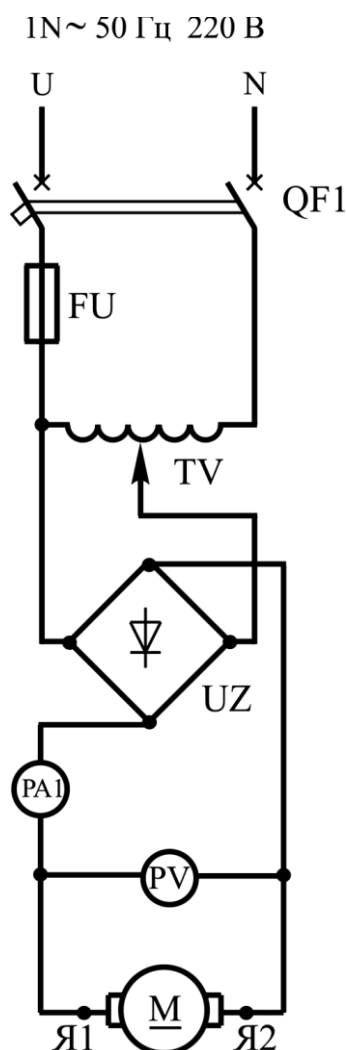


Рисунок 5.5 – Схема измерения сопротивления обмотки якоря

3.2.1. Включить автоматический выключатель QF1, убедившись, что регулятор напряжения выведен.

3.2.2. Изменяя значения напряжения в пределах от 0 до $U_{НОМ}$ снимают показания амперметра и вольтметра. Данные записывают в таблицу 5.3.

3.2.3. Выполнить расчеты аналогично п. 3.1.3.-3.1.5, результаты расчетов записать в таблицу 5.3.

3.2.4. Выключить автоматический выключатель QF1.

4. Собрать схему (рис. 5.7) для изучения генератора с независимым возбуждением.

Таблица 5.3 – Данные опыта

№	U , В	I , А	R_t , Ом	$R_{t_{CP}}$, Ом	R_{75} , Ом
1					
2					
3					
4					

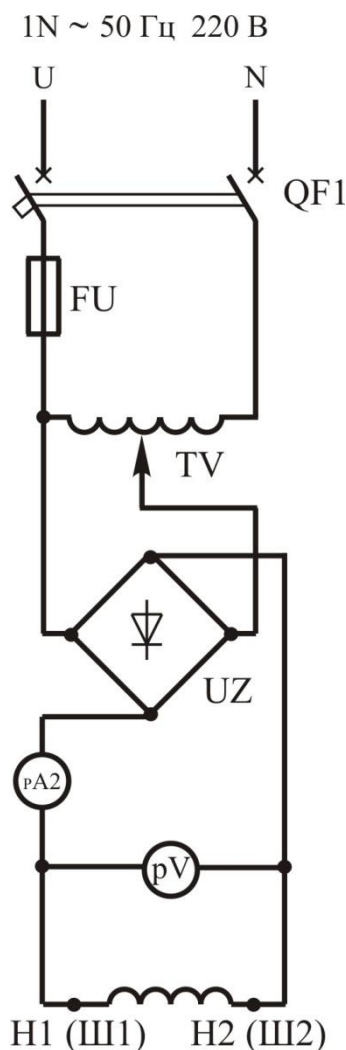


Рисунок 5.6 – Схема измерения сопротивления обмотки возбуждения

5. Снять характеристику холостого хода, то есть зависимость $E_0 = f(I_B)$ при $I_{НАГР} = 0$ и $n = \text{const}$.

5.1. Включить автоматический выключатель QF2, якорь генератора приводится во вращение (регулятор напряжения выведен, сопротивление нагрузки выведено).

5.2. Включить автоматический выключатель QF1 и постепенно увеличивая напряжения до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет $(1,1 \div 1,2) \cdot U_{НОМ}$. Производят первое измерение E_0 и тока возбуждения I_B . Постепенно уменьшая I_B до нуля делают 5...7 измерений E_0 и I_B (нисходящая ветвь). Затем снова увеличивают ток возбуждения I_B до прежнего значения, измеряя E_0 и I_B снимают восходящую ветвь. Если в процессе выполнения

работы скорость вращения отличается от номинальной, то показания вольтметра следует пересчитать по формуле:
$$E_{РАСЧ} = \frac{E_{ИЗМ} \cdot n_{НОМ}}{n_{ИЗМ}}$$
.

Результаты измерений занести в таблицу 5.4.

5.3. По данным таблицы 5.4 строятся восходящая, восходящая ветви и расчетная характеристика холостого хода.

5.4. Вывести регулятор напряжения и сопротивление нагрузки.

Таблица 5.4 – Данные опыта

Нисходящая ветвь				Восходящая ветвь			
$I_B, А$	$E_{0.ИЗМ}, В$	$n_{ИЗМ}, об/мин$	$E_{РАСЧ}, В$	$I_B, А$	$E_{0.ИЗМ}, В$	$n_{ИЗМ}, об/мин$	$E_{РАСЧ}, В$

6. Снять нагрузочную характеристику – зависимость $U = f(I_B)$ при $n = const$ и $I_{НАГР} = const$.

6.1. Постепенно увеличивая напряжения до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет 230 В. С помощью сопротивления нагрузки устанавливают $I_{НАГР} \approx 1 А$. Уменьшая I_B снимают 5...7 значений I_B и U . Результаты измерений занести в таблицу 5.5.

6.2. Вывести регулятор напряжения и сопротивление нагрузки.

6.3. По данным таблицы 5.5 построить нагрузочную характеристику на одних координатных осях с характеристикой холостого хода.

Таблица 5.5 – Данные опыта

$U, В$							
$I_B, А$							

7. Снять и построить внешнюю характеристику – зависимость $U = f(I_{НАГР})$ при $n = const$ и $I_B = const$.

7.1. Постепенно увеличивая напряжения до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет 220 В.

7.2. Постепенно нагрузить генератор (увеличивая сопротивление нагрузки) до тока $I_{НАГР} \approx 1,2 \cdot I_{НОМ}$, поддерживая с помощью регулятора напряжения ток возбуждения постоянным. Результаты измерений занести в таблицу 5.6.

Таблица 5.6 – Данные опыта

$U, \text{В}$							
$I_{\text{НАГР}}, \text{А}$							

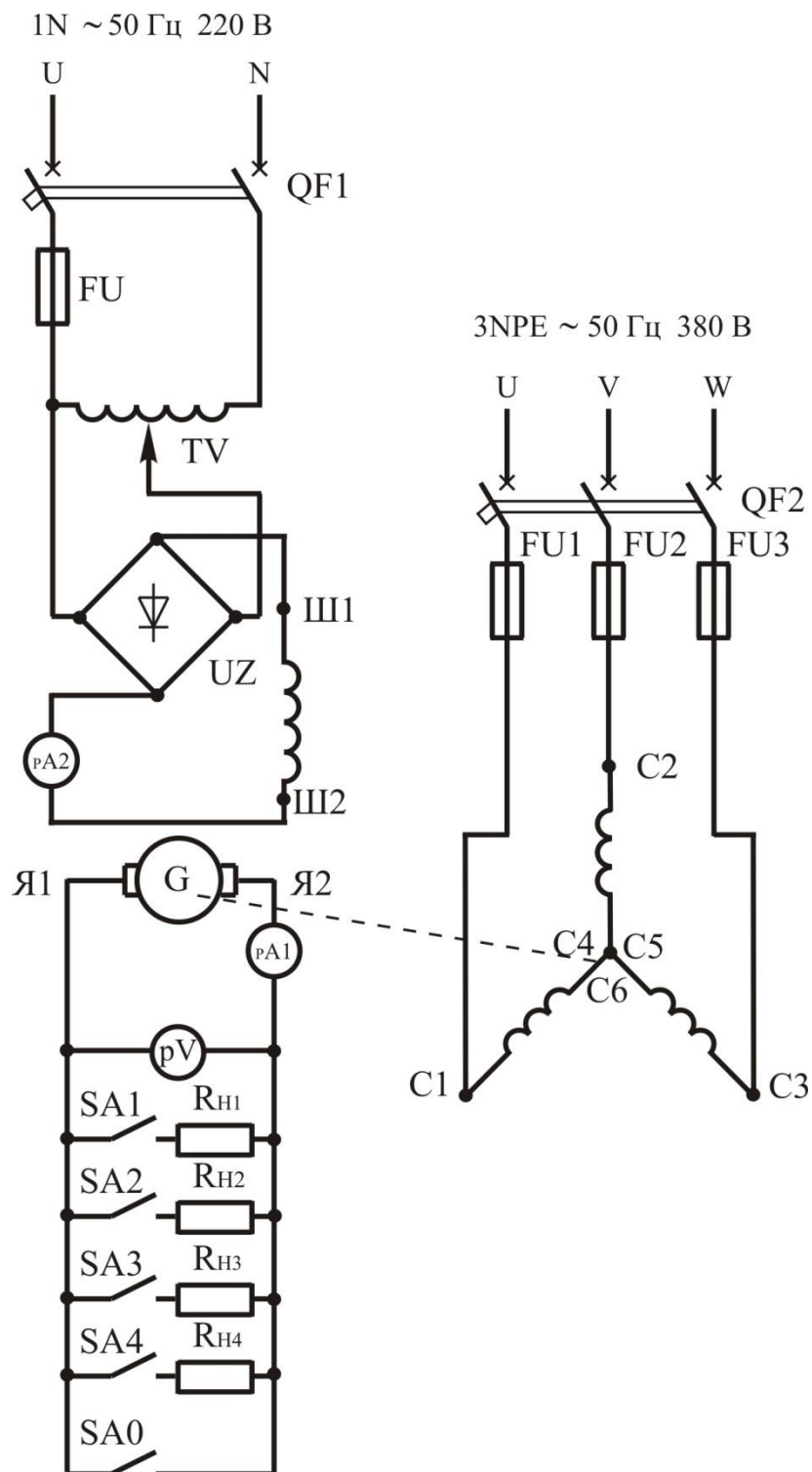


Рисунок 5.7 – Схема включения генератора постоянного тока независимого возбуждения

7.3. Вывести регулятор напряжения и сопротивление нагрузки.

7.4. По формуле 5.3 определить изменение напряжения при сбросе нагрузки.

7.5. По данным таблицы 5.6 построить внешнюю характеристику при возрастающей нагрузке.

8. Снять и построить регулировочную характеристику – зависимость $I_B = f(I_{НАГР})$ при $U = \text{const}$ и $n = \text{const}$.

8.1. Постепенно увеличивая напряжения до тех пор, пока напряжение генератора не достигнет 180 В.

8.2. Постепенно нагрузить генератор (увеличивая ток нагрузки) до номинального нагрузочного тока, регулируя при этом ток возбуждения так, чтобы напряжение на его зажимах оставалось постоянным. Результаты измерений занести в таблицу 5.7.

Таблица 5.7 – Данные опыта

I_B, A							
$I_{НАГР}, \text{A}$							

8.3. По данным таблицы 5.7 построить регулировочную характеристику при возрастающей нагрузке.

8.4. Определяем степень регулирования тока возбуждения по формуле:

$$\Delta I_B (\%) = \frac{I_{B.НОМ} - I_{B.0}}{I_{B.\hat{m}}} \cdot 100, \quad (5.7)$$

где $I_{B.НОМ}$ – номинальный ток возбуждения, необходимый для установления номинального напряжения при номинальной нагрузке; $I_{B.0}$ – ток возбуждения, создающий при холостом ходе номинальное напряжение генератора.

8.5. Вывести регулятор напряжения и сопротивление нагрузки.

9. Снять и построить характеристику короткого замыкания - зависимость $I_K = f(I_B)$ при $U = 0, n = \text{const}$.

9.1. Включить SA0. Медленно начиная с нуля увеличивать ток возбуждения до получения тока короткого замыкания равного $(1,2 \div 1,5) \cdot I_{НОМ}$. Результаты измерений занести в таблицу 5.8.

Таблица 5.8 – Данные опыта

I_B, A							
I_K, A							

9.3. Вывести регулятор напряжения и сопротивление нагрузки. Отключить автоматические выключатели QF1, QF2.

9.4. По данным таблицы 5.8 построить характеристику короткого замыкания.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.

2. Электрические схемы испытания генератора постоянного тока.
3. Результаты проведенных опытов, построенные характеристики.
4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
5. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие характеристики определяют свойства генератора независимого возбуждения?
2. Почему начальная ордината характеристики холостого хода $U_0 = f(I_B)$ не равна нулю?
3. Что представляет собой нагрузочная характеристика генератора независимого возбуждения?
4. Что представляет собой регулировочная характеристика генератора независимого возбуждения?
5. Достоинства и недостатки генераторов независимого возбуждения.
6. Принцип действия генератора постоянного тока.
7. Почему характеристика короткого замыкания имеет вид прямой линии?
8. Какие основные причины приводят к уменьшению напряжения на зажимах генератора при увеличении его нагрузки?
9. Почему при измерении сопротивления параллельной обмотки возбуждения вольтметр присоединяется за амперметром?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 6 МАШИНЫ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы:

Ознакомиться с принципом действия, назначением и устройством машин постоянного тока.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить принцип действия и устройство машин постоянного тока.
2. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Электрические машины постоянного тока используются как в качестве генераторов, так и в качестве двигателей. Электродвигатели постоянного тока имеют хорошие регулировочные свойства, значительную перегрузочную способность и позволяют получать жесткие и мягкие механические характеристики. Они широко используются для привода различных механизмов в черной металлургии (прокатные станы, роликовые транспортеры), на транспорте (электровозы, тепловозы, электропоезда, электромобили), в грузоподъемных и землеройных устройствах (краны,

шахтные подъемники, экскаваторы), на морских и речных судах, в металлообрабатывающей, бумажной, текстильной, полиграфической промышленности и др. Двигатели небольшой мощности применяют во многих системах автоматики. К недостаткам машин постоянного тока следует отнести некоторую сложность в изготовлении, более высокую стоимость, пониженную надежность (из-за наличия щеточно-коллекторного аппарата).

Принципиальная возможность создания электродвигателя постоянного тока была впервые показана М. Фарадеем в 1821 г. (в созданном им приборе проводник, по которому пропускали постоянный ток, вращался вокруг магнита).

Двигатель постоянного тока с электромагнитным возбуждением был создан в России академиком Б. С. Якоби в 1834 г., который назвал его магнитной машиной. В 1838 г. им был построен более мощный электродвигатель, который использовался для привода гребного винта речного катера. Принцип обратимости (возможность работы одной машины как в режиме генератора, так и в режиме двигателя) электрических машин был также впервые сформулирован русским физиком академиком Э. Х. Ленцем.

Значительное развитие теория электрических машин постоянного тока получила в трудах Д. А. Лачинова. В 1880 г. он опубликовал труд, в котором рассмотрел вопросы создания вращающего момента электродвигателя, условия питания электродвигателя от генератора и дал классификацию машин постоянного тока по способу возбуждения.

В XX столетии продолжалось развитие теории и совершенствование конструкции машин постоянного тока. Большое внимание обращалось на повышение надежности этих машин путем устранения причин, вызывающих возникновение искрения под щетками (улучшения коммутации) и образование кругового огня на коллекторе.

В настоящее время разработана и выпускается серия электродвигателей постоянного тока типа 2ПИ мощностью от 0,25 до 750 кВт. Эти двигатели предназначены для регулируемых электроприводов и рассчитаны на питание от полупроводниковых преобразователей. Кроме того, электропромышленность выпускает ряд двигателей постоянного тока специального исполнения – для электротяги, экскаваторов, металлургического оборудования, шахтных подъемников, буровых установок, морских и речных судов и других приводов мощностью от нескольких сотен до нескольких тысяч киловатт.

Общая конструктивная схема машин постоянного тока одинакова, хотя отдельные узлы, машин предназначенных для работы в различных отраслях промышленности, могут иметь разную конструкцию. Неподвижная часть машины постоянного тока называется статором, вращающаяся часть – ротором или якорем (рис. 6.1).

Статор состоит из станины (корпуса) 6 и главных полюсов 4. Станина служит для крепления полюсов 4, подшипниковых щитов 7 и является

частью магнитопровода, так как через нее замыкается магнитный поток машины. Станину изготавливают из стали – материала, обладающего достаточной механической прочностью и большой магнитной проницаемостью. В нижней части станины имеются лапы для крепления машины к фундаменту, а по окружности станины расположены отверстия для крепления сердечников главных полюсов. Обычно станину делают цельной из стальной трубы, либо сварной из листовой стали, за исключением машин с весьма большим наружным диаметром, у которых станину делают разъемной, что облегчает транспортировку и монтаж машины.

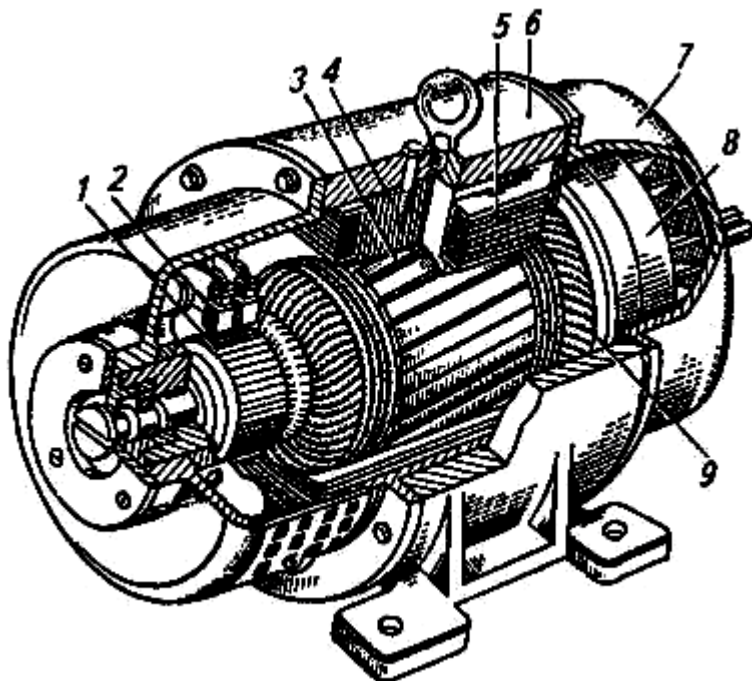


Рисунок 6.1 – Устройство машины постоянного тока:

1 – коллектор; 2 – щетки; 3 – сердечник якоря; 4 – главные полюса; 5 – полюсная катушка; 6 – станина; 7 – подшипниковый щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря.

Главные полюсы предназначены для создания в машине основного магнитного поля возбуждения, полярность полюсов чередуется. Главный полюс состоит из сердечника, полюсного наконечника и полюсной катушки (обмотки возбуждения) (рис. 6.2).

Со стороны, обращенной к якорю, сердечник полюса имеет полюсный наконечник, который обеспечивает необходимое распределение магнитной индукции в воздушном зазоре машины. Сердечники главных полюсов делают шихтованными из листовой конструкционной стали толщиной 1...2 мм или из тонколистовой электротехнической анизотропной холоднокатаной стали, например марки 3411. Штампованные пластины главных полюсов специально не изолируют, так как тонкая пленка окисла на их поверхности достаточна для значительного ослабления вихревых токов, наведенных в полюсных наконечниках пульсациями магнитного потока, вызванного зубчатостью сердечника якоря. Анизотропная сталь обладает повышенной магнитной проницаемостью вдоль проката, что должно учитываться при

штамповке пластин и их сборке в пакет. Пониженная магнитная проницаемость поперек проката способствует ослаблению реакции якоря и уменьшению потока рассеяния. В машинах постоянного тока небольшой мощности полюсные катушки делают бескаркасными – намоткой медного обмоточного провода непосредственно на сердечник полюса, предварительно наложив на него изоляционную прокладку. В большинстве машин (мощностью 1 кВт и более) полюсную катушку делают каркасной: обмоточный провод наматывают на каркас (обычно пластмассовый), а затем надевают на сердечник полюса. В некоторых конструкциях машин полюсную катушку для более интенсивного охлаждения разделяют по высоте на части, между которыми оставляют вентиляционные каналы.

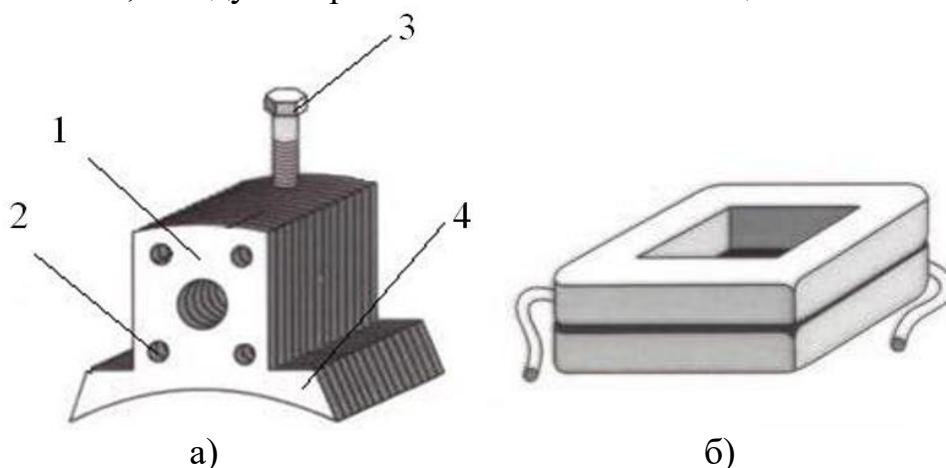


Рисунок 6.2 – Главный полюс (а) и обмотка возбуждения (б):

1 – сердечник; 2 – заклепки; 3 – установочный болт; 4 – полюсный наконечник.

В машинах мощностью свыше 1 кВт между главными полюсами устанавливают дополнительные полюса для уменьшения искрения под щетками. Добавочный полюс (рис. 6.3) состоит из сердечника 1, изготовляемого из стали, и обмотки 2, изготовляемой из медных шин прямоугольного сечения. Обмотки добавочных полюсов соединяют последовательно с обмоткой якоря, а полюсы устанавливают между главными полюсами и крепят к станине болтами. Воздушный зазор под добавочными полюсами значительно больше, чем под главными. Поперечное сечение добавочных полюсов расширяется в сторону корпуса. Это увеличивает поверхность прилегания добавочного полюса, что дает большую устойчивость.

Якорь машины постоянного тока состоит из вала, сердечника 3 с обмоткой 9 и коллектора 1 (рис. 6.1). Сердечник якоря имеет шихтованную конструкцию, набирается из штампованных пластин тонколистовой электротехнической стали (рис. 6.4). Листы покрывают изоляционным лаком, собирают в пакет и запекают. Готовый сердечник напрессовывают на вал якоря. Такая конструкция сердечника якоря позволяет значительно ослабить в нем вихревые токи, возникающие в результате его перемагничивания в процессе вращения в магнитном поле. На поверхности сердечника якоря имеются продольные пазы, в которые укладывают обмотку якоря.

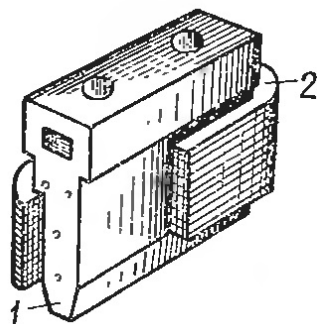


Рисунок 6.3 – добавочный полюс: 1 – сердечник; 2 – обмотка.

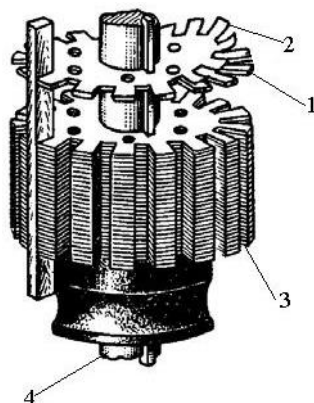


Рисунок 6.4 – Сердечник якоря:

1 – стальной лист; 2 – изоляционная пленка; 3 – сердечник; 4 – вал.

Обмотку выполняют медным проводом круглого или прямоугольного сечения. Пазы якоря после заполнения их проводами обмотки обычно закрывают клиньями (текстолитовыми или гетинаксовыми). В некоторых машинах пазы не закрывают клиньями, а накладывают на поверхность якоря бандаж. Бандаж делают из проволоки или стеклоленты с предварительным натягом. Лобовые части обмотки якоря крепят к обмоткодержателям бандажом.

Коллектор является одним из сложных узлов машины постоянного тока. Коллектор представляет собой цилиндрическую конструкцию, собранную из клинообразных коллекторных пластин, между которыми проложены изоляционные прокладки из миканита (рис. 6.5). Выводы секций обмотки якоря припаивают или запрессовывают к выступам коллекторных пластин, которые называют петушками. Узкие края коллекторных пластин имеют форму ласточкина хвоста, что позволяет с помощью стяжных колец получить жесткую конструкцию. В машинах малой мощности коллекторные пластины с миканитовыми прокладками запрессовывают в пластмассу.

После сборки коллектора его протачивают и тщательно шлифуют. Миканитовые пластины фрезеруют на глубину 0,8...1,5 мм ниже поверхности коллектора.

По поверхности коллектора скользят токосъемы-щетki. Последние представляют собой бруски прямоугольного сечения, изготовленные из

порошков графита и других компонентов путем прессования и термической обработки (рис. 6.6, а).

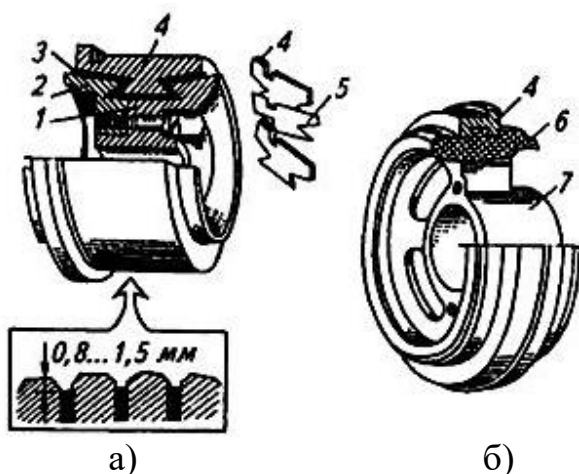


Рисунок 6.5 – Конструкция коллектора с нажимными шайбами (а) и коллектора на пластмассе (б):

1 – корпус; 2 – нажимные шайбы; 3 – изоляционная манжета; 4 – коллекторные пластины; 5 – изоляционные прокладки; 6 – пластмасса; 7 – втулка.

Щетки устанавливают в щеткодержателях (рис. 6.6, б) и прижимают к поверхности коллектора с помощью пружин. Щеткодержатели укрепляют на щеточных пальцах и изолируют от них. Пальцы крепят либо к подшипниковому щиту, либо на специальной траверсе (рис. 6.6, в), с помощью которой можно поворачивать одновременно все щетки относительно полюсов машины.

Из рассмотрения устройства коллекторной машины постоянного тока следует, что неизменным элементом этой машины, включенным между обмоткой якоря и внешней сетью, является щеточно-коллекторный узел – механический преобразователь рода тока.

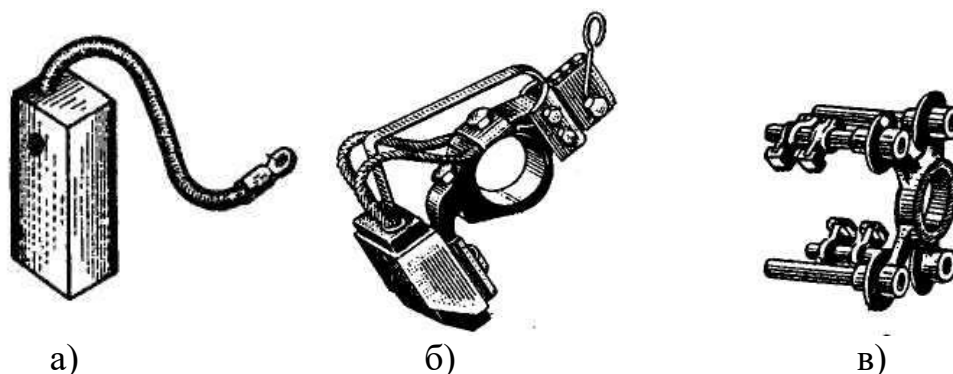


Рисунок 6.6 – Элементы щеточного аппарата: а) щетка; б) щеткодержатель; в) траверса.

Рассмотрим принцип действия коллекторного генератора постоянного тока. На рис. 6.7 изображена упрощенная модель такого генератора: между полюсами N и S постоянного магнита находится вращающаяся часть

генератора – якорь, вал которого посредством шкива и ременной передачи механически связан с приводным двигателем (на рисунке не показан) – источником механической энергии. В двух продольных пазах на сердечнике якоря расположена обмотка в виде одного витка $abcd$, концы которого присоединены к двум медным изолированным друг от друга полукольцам, образующим простейший коллектор. На поверхность коллектора наложены щетки A и B , осуществляющие скользящий контакт с коллектором и связывающие генератор с внешней цепью, куда включена нагрузка сопротивлением R .

Предположим, что приводной двигатель вращает якорь генератора против часовой стрелки, тогда в одном проводнике витка якоря, вращающемся в магнитном поле постоянного магнита, наводится ЭДС, мгновенное значение которой определяется:

$$\dot{a}_{iD} = \dot{A} \cdot l \cdot v, \quad (6.1)$$

где B – величина магнитной индукции в воздушном зазоре между полюсом и якорем в месте расположения проводника; l – активная длина проводника, т. е. та длина, на протяжении которой он расположен в магнитном поле; v – линейная скорость движения проводника.

Направление ЭДС может быть определено по правилу правой руки (рис. 6.8, а). Если расположить правую ладонь так, чтобы отставленный в сторону большой палец показывал направление движения проводника, а силовые линии магнитного поля входили в ладонь, то направление ЭДС совпадет с направлением вытянутых пальцев.

Поскольку поток полюсов предполагается неизменным, то эта ЭДС индуцируется только вследствие вращения якоря и называется ЭДС вращения.

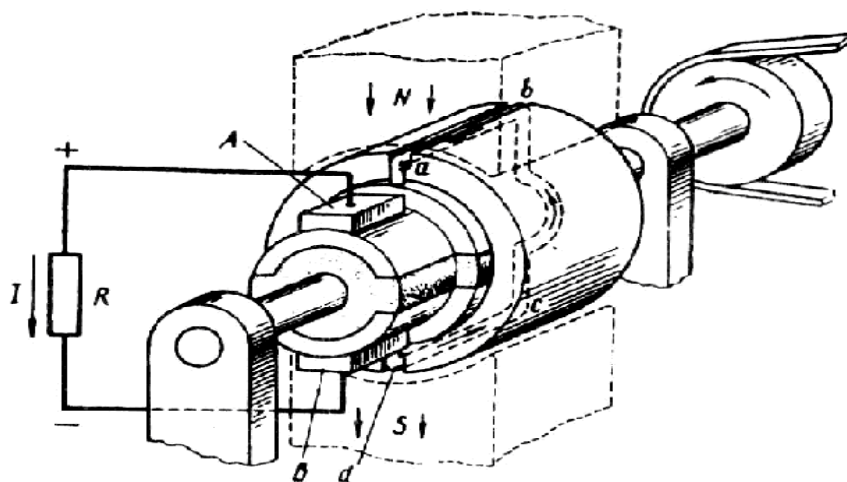


Рисунок 6.7 – Упрощенная модель коллекторной машины

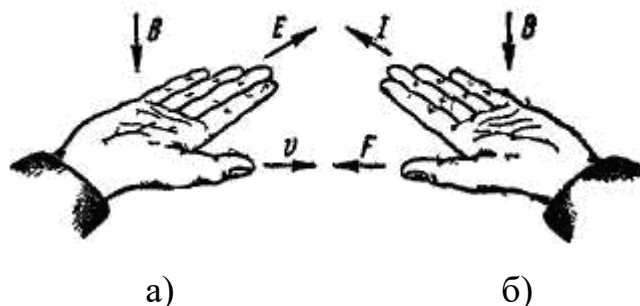


Рисунок 6.8 – Правила правой (а) и левой (б) руки

В обоих проводниках вследствие симметрии индуцируются одинаковые ЭДС которые по контуру витка складываются, и поэтому полная ЭДС якоря рассматриваемой машины определяется по формуле:

$$E_a = 2 \cdot e_{iD} = 2 \cdot B \cdot l \cdot v. \quad (6.2)$$

ЭДС E_a является переменной, так как проводники обмотки якоря проходят попеременно под северным и южным полюсами, в результате чего направление ЭДС в проводниках меняется.

Если бы в машине не было коллектора, то ток во внешней цепи (в нагрузке R) был бы переменным, но посредством коллектора и щеток переменный ток обмотки якоря преобразуется в пульсирующий ток во внешней цепи генератора, т. е. ток, неизменный по направлению. При положении витка якоря, показанном на рис. 6.7, ток во внешней цепи (в нагрузке) направлен от щетки А к щетке В, следовательно, щетка А является положительной, а щетка В – отрицательной. После поворота якоря на 180° (рис. 6.8) направление тока в витке якоря изменится на обратное, однако полярность щеток, а, следовательно, и направление не тока во внешней цепи (в нагрузке) останутся неизменными (рис. 6.8). Объясняется это тем, что в тот момент, когда ток в витке якоря меняет свое направление, происходит смена коллекторных пластин под щетками. Таким образом, под щеткой А всегда находится пластина, соединенная с проводником, расположенным под северным магнитным полюсом, а под щеткой В – пластина, соединенная с проводником, расположенным под южным полюсом. Благодаря этому полярность щеток генератора остается неизменной независимо от положения витка якоря. Что же касается пульсаций тока во внешней цепи, то они намного ослабятся при увеличении числа витков в обмотке якоря при их равномерном распределении по поверхности якоря и соответствующем увеличении числа пластин в коллекторе. Уже при 16 витках пульсации тока становятся практически незаметным и ток во внешней цепи генератора можно считать постоянным не только по направлению, но и по значению.

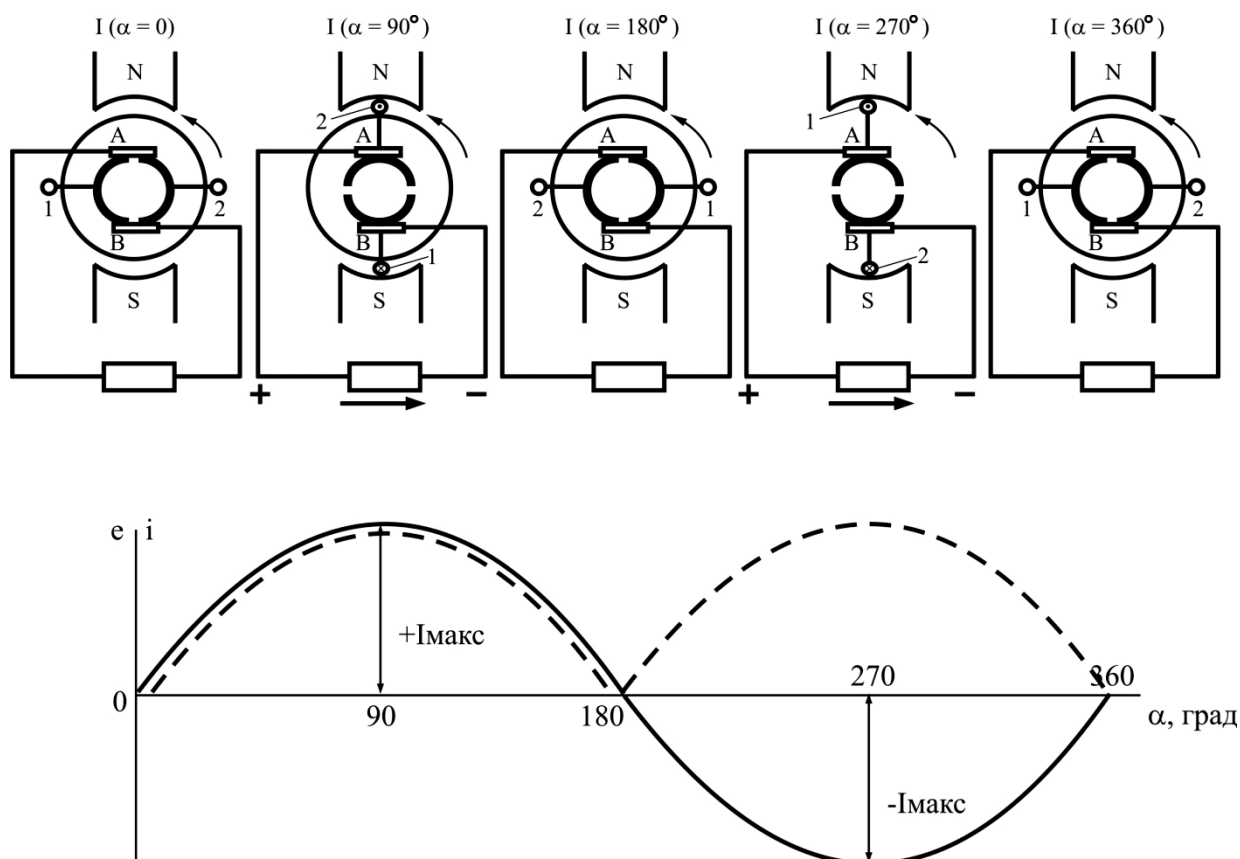


Рисунок 6.9 – К принципу действия генератора постоянного тока:

- ЭДС и ток в обмотке якоря;
- ЭДС и ток во внешней цепи генератора

В соответствии с принципом обратимости электрических машин упрощенная модель машины постоянного тока может быть использована в качестве двигателя постоянного тока. Для этого необходимо отключить нагрузку генератора R и подвести к щеткам машины напряжение от источника постоянного тока. Например, если к щетке А подключить зажим «плюс», а к щетке В «минус», то в обмотке якоря появится ток I , направление которого показано на рисунке 6.10. В результате взаимодействия этого тока с магнитным полем постоянного магнита (полем возбуждения) появятся электромагнитные силы $F_{ЭМ}$. Направление действия силы можно определить по правилу левой руки (рис. 6.8, б). Если расположить левую ладонь так, чтобы вытянутые пальцы совпадали с направлением тока, а силовые линии магнитного поля входили в ладонь, то отставленный в сторону большой палец укажет направление силы, действующей на проводник. Совокупность всех сил $F_{ЭМ}$ создает на якоре электромагнитный момент M и вращающий его. После поворота якоря на 180° электромагнитные силы не изменят своего направления, так как одновременно с переходом каждого проводника обмотки якоря из зоны одного магнитного полюса в зону другого полюса в этих проводниках меняется направление тока.

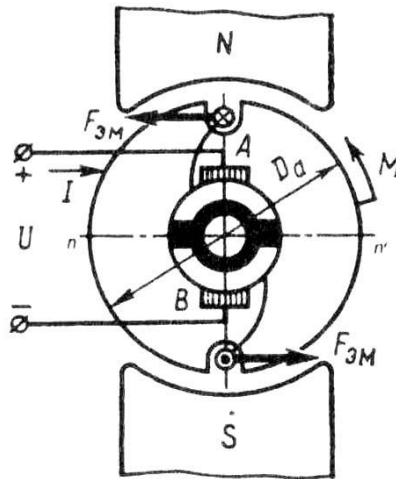


Рисунок 6.10 – К принципу действия двигателя постоянного тока

Таким образом, назначение коллектора и щеток в двигателе постоянного тока – изменять направление тока в проводниках обмотки якоря при их переходе, а при работе машины генераторам – «выпрямление» ЭДС и тока.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Краткие ответы на контрольные вопросы.
4. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Области применения машин постоянного тока?
2. Назначение коллектора в двигателе и в генераторе?
3. Почему станину машины делают из стали?
4. Зачем в коллекторе на пластмассе применяют армирующие кольца?
5. Достоинства и недостатки машин постоянного тока.
6. Принцип действия генератора.
7. Принцип действия двигателя.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 7 СХЕМЫ И ГРУППЫ СОЕДИНЕНИЙ ОБМОТОК ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы:

Ознакомиться со схемами и группами соединений обмоток трансформатора. Изучить особенности применения различных схем и групп соединения обмоток трансформатора

Порядок выполнения работы:

1. Изучить способы преобразования трехфазного тока при помощи схемам и группам соединений обмоток трансформатора.
2. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Первичная и вторичная обмотки трехфазных трансформаторов могут быть соединены по схемам "звезда", "звезда с выведенной нулевой точкой", "треугольник" или "зигзаг с выведенной нулевой точкой".

Схему соединения "звезда" обозначают русской буквой У или латинской Y, схему "треугольник" - знаком Δ , или русской буквой Д; схему "зигзаг" обозначают латинской буквой Z. Если нулевая точка обмотки выведена из трансформатора, то у буквенного обозначения ставят индекс "н".

Начала и концы обмотки высшего напряжения (ВН) обозначают А, В, С и X, Y, Z соответственно. Начала и концы обмотки низшего напряжения (НН) обозначают а, в, с и x, y, z. Выводы нулевой точки обозначают 0 (для ВН) и 0 (для НН).

Схемы соединения обмоток силовых трансформаторов, применяемых в России, приведены в таблице 7.1.

Соединение в "зигзаг" используется только в специальных случаях, когда возможна неравномерная нагрузка фаз с наличием токов нулевой последовательности, например, в трансформаторах для выпрямителей. Для выполнения соединения каждую фазу обмотки НН делят на две части, располагая их на разных стержнях. Указанные части обмоток соединяют так, чтобы конец одной части фазной обмотки был присоединен к концу другой части этой же обмотки, расположенной на другом стержне. "Зигзаг" называют равноплечным, если части обмоток, расположенные на разных стержнях и соединяемые последовательно, одинаковы, и неравноплечным, если эти части неодинаковы. При соединении в "зигзаг" ЭДС отдельных частей обмоток геометрически вычитаются, поэтому расход обмоточного провода при соединении в "зигзаг" увеличивается на 15 %.

Выбор схемы соединения обмоток зависит от ряда причин. Например, для сетей с напряжением 35 кВ и более выгодно соединить обмотку трансформатора в "звезду" и заземлить нулевую точку, так как при этом напряжение выводов трансформатора и проводов линии передач относительно земли будет всегда в $\sqrt{3}$ раза меньше линейного, что приводит к снижению стоимости изоляции. Осветительные лампы накаливания более низкого напряжения имеют большую световую отдачу, а осветительные сети выгодно строить на более высокое напряжение. Поэтому вторичные обмотки трансформаторов, питающих осветительные сети, соединяют обычно в "звезду" и осветительные лампы включают на фазное напряжение - между линейными и нулевыми проводами. При соединении обмоток "звездой"

линейное напряжение больше фазного ($U_E = \sqrt{3} \cdot U_\phi$), а при соединении обмоток "треугольником" линейное напряжение равно фазному ($U_E = U_\phi$).

С другой стороны с точки зрения влияния высших гармоник и поведения трансформатора при несимметричных режимах нагрузки целесообразно соединять одну из обмоток в треугольник.

Таблица 7.1 – Схемы соединения обмоток силовых трансформаторов

Схема соединения обмоток		Векторная диаграмма ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				Y/Y _H – 0
				Y/Δ – 11
				Y _H /Δ – 11
				Y/Z _H – 11
				Δ/Y _H – 11

Отношение линейных напряжений трехфазного трансформатора определяется не только отношением чисел витков фазных обмоток, но и схемой соединения обмоток (табл. 7.2), что позволяет уменьшить число витков и снизить трудоемкость изготовления обмоток.

Таблица 7.2 – Отношение линейных напряжений трехфазного трансформатора при различных схемах соединения обмоток

Схема соединения обмоток	Δ/Δ	Δ/Y	Y/Y	Y/Δ
Отношение линейных напряжений	U_1/U_2	$U_1/(\sqrt{3} U_2)$	U_1/U_2	$\sqrt{3} U_1/U_2$

Особенности режима холостого хода. В однофазном трансформаторе из-за насыщения магнитной цепи ток холостого хода при синусоидальном магнитном потоке оказывается несинусоидальным, т. е. возникает ряд высших гармонических.

В трехфазном трансформаторе выражения для тока холостого хода в фазах имеют вид:

$$i_{0A} = I_{01m} \cdot \sin \omega t + I_{03m} \cdot \sin 3\omega t + \dots;$$

$$i_{0B} = I_{01m} \cdot \sin(\omega t - 2\pi/3) + I_{03m} \cdot \sin 3(\omega t - \pi/3) + \dots;$$

$$i_{0C} = I_{01m} \cdot \sin(\omega t - 4\pi/3) + I_{03m} \cdot \sin 3(\omega t - 4\pi/3) + \dots$$

Третьи гармонические токов во всех фазах совпадают по времени: $i_{03A} = i_{03B} = i_{03C} = i_{03m} \cdot \sin 3\omega t$. При некоторых схемах включения обмоток это оказывает влияние на форму кривой магнитного потока трансформатора, а следовательно, и на форму кривой ЭДС.

При соединении обмоток трансформатора по схеме Y_H/Y третьи гармонические фазных токов замыкаются по нулевому проводу. При этом ток холостого хода i_0 в каждой фазе содержит третью гармоническую i_{03} , а поток Φ является синусоидальным. При соединении обмоток по схеме Y/Y путь для замыкания третьих гармонических фазных токов отсутствует и ток холостого хода оказывается синусоидальным. В результате этого кривая магнитного потока Φ искажается и приобретает плоскую форму; при этом поток содержит третью гармоническую Φ_3 . Несинусоидальными являются и ЭДС, индуцированные в фазах, они имеют заостренную форму.

Отметим, что в трехстержневом трансформаторе возникающие третьи гармонические потоков фаз Φ_{A3} , Φ_{B3} , Φ_{C3} не могут замыкаться по стальному магнитопроводу, так как они аналогично третьим гармоническим токам совпадают по времени и, следовательно, в любой момент времени направлены по контуру магнитопровода встречно. Поэтому эти гармонические выходят из стержней и замыкаются от ярма к ярму через воздух, т. е. по пути, имеющему большое магнитное сопротивление. Вследствие этого третьи гармонические потоки малы и потоки фаз Φ_A , Φ_B и Φ_C в трехстержневом трансформаторе мало отличаются от синусоидальных.

Обычно амплитуды потоков фаз отличаются на 5÷10% от амплитуд гармонических, что вызывает соответствующее небольшое искажение формы кривой фазных ЭДС. Еще одним отрицательным последствием возникновения третьих гармонических потоков фаз является увеличение потерь мощности. Эти потоки в трехстержневом трансформаторе

замыкаются главным образом по стенкам бака, стяжным болтам и другим металлическим конструктивным деталям, окружающим магнитопровод. При этом в них индуцируются вихревые токи, создающие дополнительные потери мощности и местный нагрев соответствующих деталей. Дополнительные потери значительны только в трансформаторах мощностью свыше 1000 кВ·А. В трансформаторах меньшей мощности их, практически, можно не учитывать.

В группах, состоящих из трех однофазных трансформаторов, третьи гармонические потоков фаз могут замыкаться по тому же пути, что и основная гармоническая, и вследствие этого достигают недопустимой величины. Поэтому для таких групп схему У/У не применяют.

Если одна из обмоток трансформатора соединена треугольником, то фазные потоки трансформатора становятся практически синусоидальными. Это объясняется тем, что в обмотке, соединенной треугольником, совпадающие по времени третьи гармонические ЭДС вызывают ток тройной частоты I_{23} , который циркулирует по обмоткам фазы и уменьшает третьи гармонические потоков. Упрощенно можно считать, что результирующий поток тройной частоты является суммой третьих гармонических потоков, создаваемых первичной и вторичной обмотками. Следовательно, результирующий поток $\Phi_{рез3}$ незначителен, так как для токов тройной частоты обмотка, соединенная треугольником, является короткозамкнутой и даже небольшая ЭДС E_{23} вызывает значительный ток I_{23} .

Таким образом, обмотки трехстержневых трансформаторов лучше всего соединять по схемам У/Д и У_Н/Д, которые позволяют практически устранить третьи гармонические в кривых потока и в ЭДС. Силовые трансформаторы средней мощности при вторичных напряжениях не более 400 В можно соединять и по схемам У/У_Н и Д/У_Н, так как это позволяет получать от вторичной обмотки не только линейное напряжение 380 В, используемое в силовых цепях, но и фазное напряжение 220 В, требуемое для осветительных установок.

Группы соединения обмоток трансформатора. Трансформаторы делят на группы в зависимости от сдвига по фазе линейных напряжений высокой и низкой стороны, измеренных на одноименных зажимах.

В однофазных трансформаторах напряжения первичной и вторичной обмоток могут совпадать по фазе или быть сдвинуты на 180° . Это зависит от направления намотки обмоток и обозначения выводов, то есть от маркировки. Если обмотки трансформатора намотаны в одну сторону и имеют симметричную маркировку выводов (рис. 7.1, а), то индуцированные в них ЭДС имеют одинаковое направление, следовательно, совпадают по фазе и напряжения. При изменении маркировки выводов одной из фаз или направления намотки одной фазы (рис. 7.1, б) получается сдвиг по фазе между векторами первичного и вторичного напряжения, равный 180° .

Группы соединений обозначают целыми числами от 0 (12) до 11, так как сдвиг фаз может изменяться от 0 до 360° , а кратность сдвига составляет 30° . Номер группы определяют величиной угла между векторами линейного

напряжения обмотки НН и ВН. Для определения номера группы этот угол следует разделить на 30° . Номер группы можно определить также иначе, для чего вектор линейного напряжения обмотки ВН условно считают минутной стрелкой часов и совмещают с цифрой 12. Тогда вектор линейного напряжения обмотки НН, принятый за часовую стрелку, расположится на цифре часового циферблата, определяющей номер группы.

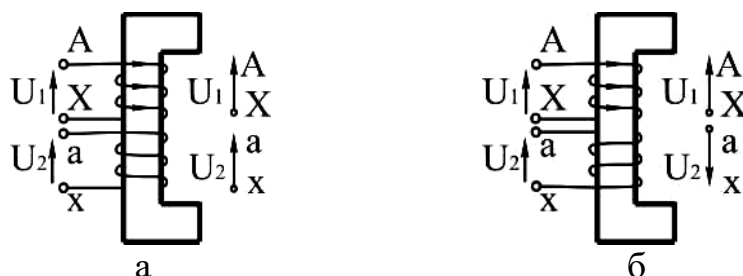


Рисунок 7.1 – Группы соединений обмоток однофазного трансформатора:
а - нулевая; б - шестая.

Для однофазных трансформаторов возможны только две группы соединений: нулевая и шестая. Однако отечественная промышленность выпускает однофазные трансформаторы только нулевой группы, у которых напряжения первичной и вторичной обмоток совпадают по фазе.

В трехфазных трансформаторах фазные ЭДС двух обмоток, расположенных на одном и том же стержне, могут так же, как и в однофазных трансформаторах совпадать, или быть противоположными по фазе. В зависимости от схемы соединения обмоток (Y или Δ) и порядка соединения их начал и концов получают различные углы сдвига фаз между линейными напряжениями. Для примера на рисунке 7.2 показаны схемы соединения обмоток Y/ Δ и соответствующие векторные диаграммы для одиннадцатой (а) и пятой (б) группы.

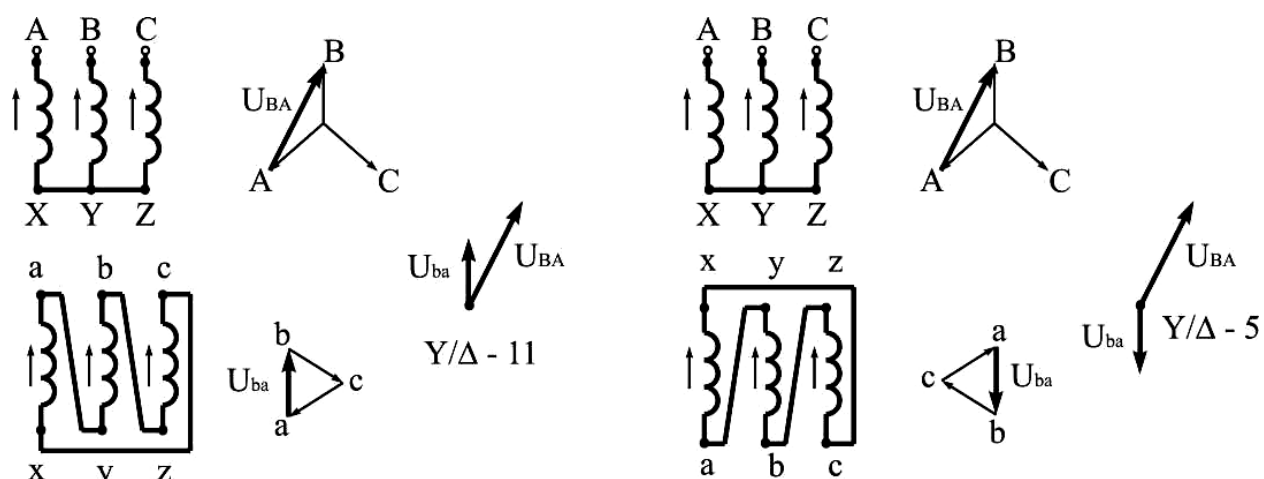


Рисунок 7.2 – Группы соединений обмоток трехфазного трансформатора при схеме Y/ Δ

Изменяя маркировку выводов обмоток, можно получить и другие группы соединений: при схеме Y/Y – четные: вторую, четвертую и т.д., при

схеме Y/Δ – нечетные: первую, третью и др. Согласно ГОСТ 11677-85 Российская промышленность выпускает трехфазные силовые трансформаторы только двух групп: нулевой и одиннадцатой. Это облегчает практическое включение трансформаторов на параллельную работу.

При изготовлении или в процессе эксплуатации трансформаторов иногда возникает необходимость в опытной проверке группы соединения. Существует несколько методов такой проверки. Наиболее распространенными являются метод фазометра и метод вольтметра.

Метод фазометра основан на непосредственном измерении угла фазового сдвига между соответствующими линейными напряжениями (ЭДС) обмоток ВН и НН с помощью фазометра φ. Параллельную обмотку фазометра $U - U$ подключают к стороне ВН, а последовательную обмотку $I - I$ - к стороне НН. Для ограничения тока в последовательной обмотке ее подключают через добавочное сопротивление $r_{доб}$. Затем трансформатор включают в сеть с симметричным трехфазным напряжением. Для удобства измерений желательно, чтобы фазометр имел полную (360^0) шкалу.

Метод вольтметра – косвенный метод, основанный на измерении вольтметром напряжений (ЭДС) между одноименными выводами обмоток ВН и НН (рис. 7.3, а). Если проверяют группу соединения Y/Y- 0, то, соединив проводами выводы А и а, измеряют напряжение U_{bB} и U_{cC} (рис. 7.3, а). Если предполагаемая группа соединения Y/Y – 0 соответствует фактической, то условие равенства напряжений выполняется:

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{aA} \cdot (K_l - 1), \quad (7.1)$$

где $K_l = U_{AB}/U_{ab}$ - линейный коэффициент трансформации напряжений, равный отношению линейных напряжений ВН и НН.

Для группы Y/Y – 6:

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{xy} (K_l + 1). \quad (7.2)$$

Для группы Y/Δ – 11:

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{ab} \cdot \sqrt{1 - \sqrt{3} \cdot K_{\bar{e}} + K_{\bar{e}}^2}. \quad (7.3)$$

Для группы Y/Δ – 5:

$$U_{bB} = U_{cC} = U_{\dot{a}b} \cdot \sqrt{1 + \sqrt{3} \cdot K_{\bar{e}} + K_{\bar{e}}^2}. \quad (7.4)$$

Если условия равенства напряжений по приводимым формулам не соблюдаются, то это свидетельствует о нарушениях в маркировке выводов трансформатора.

Проверка маркировки обмоток. Для опытной проверки обозначений начал и концов обмотки ВН ее фазные обмотки соединяют «звездой» и подключают одну из фаз к сети, например, напряжением $U = 220$ В. Затем измеряют ЭДС обмоток и междуфазные напряжения. В соответствии со схемой на рисунке 7.3, б магнитный поток в среднем стержне магнитопровода, где размещается обмотка фазы В в 2 раза больше, чем магнитные потоки в крайних стержнях, и имеет противоположное им

направление. Тогда при правильной маркировке обмоток измеренные ЭДС и напряжения будут равны: $E_{YB} \approx U$; $E_{XA} = E_{ZC} = 0,5U$; $U_{AB} = U_{BC} = 1,5U$. Если маркировка обмоток выполнена неправильно, то одно из напряжений U_{AB} или U_{bc} (или оба) будет равно $0,5U$.

Маркировку обмоток НН проверяют поочередно для каждой фазы (рис. 7.3, б). При правильной маркировке напряжение, измеренное между концами обмоток ВН и НН, равно, например, для фазы А: $U_{Xx} = U_{AX} - U_{ax}$.

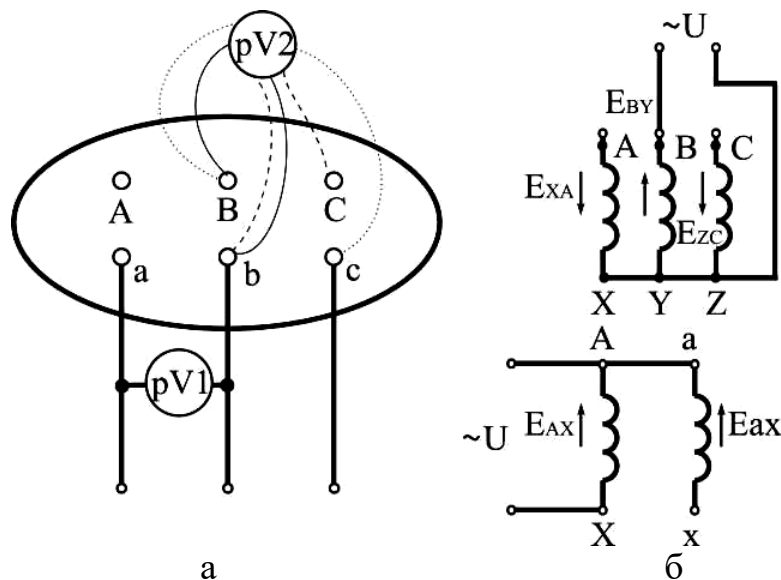


Рисунок 7.3 – Схемы для определения группы соединения обмоток методом двух вольтметров (а) и для проверки маркировки обмоток (б)

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Краткие ответы на контрольные вопросы.
4. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какими буквами обозначаются начала и концы обмоток трехфазного трансформатора?
2. Какие схемы соединения обмоток вы знаете? Их обозначение.
3. От чего зависит выбор схем соединения обмоток трансформатора?
4. Как изменится отношение линейных напряжений трехфазного трансформатора, если его обмотки переключить со схемы Δ/Y на Y/Δ ?
5. Что такое группа соединения и как она обозначается?
6. Какие группы соединений предусмотрены ГОСТ?
7. Как изменится отношение линейных напряжений трансформатора, если нулевую группу соединения изменить на одиннадцатую?
8. Достоинства и недостатки схемы соединения обмоток Z.

9. Какие методы проверки группы соединения обмоток трансформатора и маркировки обмоток вы знаете? В чем сущность этих методов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 8 ТРАНСФОРМАТОРЫ

Цель работы:

Изучить назначение, устройство, принцип действия и область применения трансформаторов.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить принцип работы, конструктивные особенности, область применения трансформаторов.
2. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Трансформатором называют статическое электромагнитное устройство, имеющее две (или более) индуктивно связанные обмотки и предназначенное для преобразования посредством явления электромагнитной индукции одной (первичной) системы переменного тока в другую (вторичную) систему переменного тока.

Трансформаторы широко применяются в системах передачи и распределения электроэнергии. Например, при передаче электроэнергии мощностью 10^6 кВт на расстояние 1000 км необходимо напряжение 500 кВ. Получить такое высокое напряжение в генераторе экономически не выгодно, поэтому электроэнергия после генератора подается на повышающий трансформатор, в котором напряжение увеличивается до требуемого значения.

Наибольшее применение в электротехнических установках, а также в энергетических системах передачи и распределения энергии имеют силовые трансформаторы, посредством которых изменяют значения переменного напряжения и тока. При этом число фаз, форма кривой напряжения (тока) и частота остаются неизменными.

Принцип действия трансформатора. Простейший силовой трансформатор состоит из магнитопровода (сердечника), выполненного из ферромагнитного материала (обычная листовая электротехническая сталь) и двух обмоток, расположенных на стержнях магнитопровода (рис. 8.1).

Одна из обмоток, которую называют первичной, присоединена к источнику переменного тока G на напряжение U_1 , к другой обмотке, называемой вторичной, подключен потребитель $Z_{НАГР}$. Первичная и вторичная обмотки трансформатора не имеют электрической связи друг с другом, и мощность из одной обмотки в другую передается электромагнитным путем. Магнитопровод, на котором расположены эти обмотки, служит для усиления индуктивной связи между обмотками.

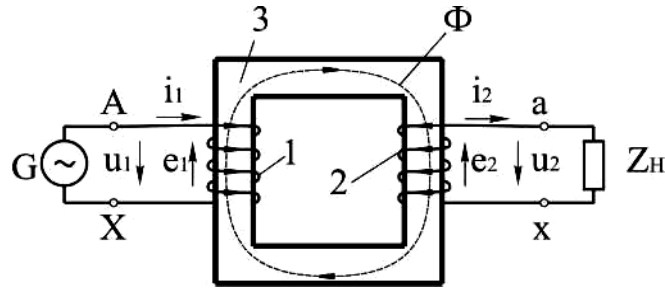


Рисунок 8.1 – Электромагнитная схема трансформатора

Действие трансформатора основано на явлении электромагнитной индукции. При подключении первичной обмотки к источнику переменного тока в витках этой обмотки протекает переменный ток i_1 , который создает в магнитопроводе переменный магнитный поток Φ . Замыкаясь по магнитопроводу, этот поток сцепляется с обеими обмотками (первичной и вторичной) и индуцирует в них ЭДС:

в первичной обмотке ЭДС самоиндукции

$$e_1 = -w_1 \cdot \frac{d\Phi}{dt};$$

во вторичной обмотке ЭДС взаимной индукции

$$e_2 = -w_2 \cdot \frac{d\Phi}{dt},$$

где w_1 и w_2 – число витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

При подключении нагрузки $Z_{НАГР}$ к выводам вторичной обмотки трансформатора под действием ЭДС e_2 в цепи этой обмотки создается ток i_2 , а на выходах вторичной обмотки устанавливается напряжение U_2 . В повышающих трансформаторах – $U_2 > U_1$, а в понижающих – $U_2 < U_1$.

ЭДС e_1 и e_2 , наводимые в обмотках трансформатора, отличаются друг от друга лишь за счет разного числа витков w_1 и w_2 в обмотках, поэтому, применяя обмотки с требуемым соотношением витков, можно изготовить трансформатор на любое отношение напряжений.

Обмотку трансформатора, подключенную к сети с более высоким напряжением, называют обмоткой высшего напряжения (ВН); обмотку, присоединенную к сети меньшего напряжения – обмоткой низшего напряжения (НН).

Трансформаторы обладают свойством обратимости, один и тот же трансформатор можно использовать в качестве повышающего и понижающего. Но обычно трансформатор имеет определенное назначение: либо он повышающий, либо - понижающий.

Трансформатор - это аппарат переменного тока. Если же его первичную обмотку подключить к источнику постоянного тока, то магнитный поток в магнитопроводе трансформатора также будет постоянным как по величине, так и по направлению равен нулю, поэтому в обмотках трансформатора не

будет наводиться ЭДС, а, следовательно, электроэнергия из первичной цепи не будет передаваться во вторичную цепь.

Классифицируют трансформаторы по нескольким признакам:

по назначению – силовые общего назначения, силовые специального назначения, импульсные, для преобразования частоты и т.д.;

по виду охлаждения – с воздушным (сухие трансформаторы) и масляным (масляные трансформаторы) охлаждением;

по числу трансформируемых фаз – однофазные и трехфазные;

по форме магнитопровода – стержневые, броневые, бронестержневые, тороидальные;

по числу обмоток на фазу – двухобмоточные, многообмоточные.

Современный трансформатор состоит из различных конструктивных элементов: магнитопровода, обмоток, вводов, бака и др. Магнитопровод с насаженными на его стержни обмотками составляет активную часть трансформатора. Остальные элементы трансформатора называют неактивными (вспомогательными или пассивными) частями. Рассмотрим подробнее конструкцию основных частей трансформатора.

Магнитопровод в трансформаторе выполняет две функции: во-первых, он составляет магнитную цепь, по которой замыкается основной магнитный поток трансформатора, а во-вторых, он является основой для установки и крепления обмоток, отводов, переключателей. Магнитопровод имеет шихтованную конструкцию, т.е. он состоит из тонких (обычно толщиной $0,28 \div 0,5$ мм) стальных пластин, покрытых с двух сторон изолирующей пленкой (например, лаком). Такая конструкция магнитопровода обусловлена стремлением ослабить вихревые токи, наводимые в нем переменным магнитным потоком, а, следовательно, уменьшить величину потерь энергии в трансформаторе.

Силовые трансформаторы выполняются с магнитопроводами трех типов: стержневого, броневоего и бронестержневого.

В магнитопроводе стержневого типа (рис. 8.2) вертикальные стержни 1, на которых расположены обмотки 2, сверху и снизу замкнуты ярмами 3. На каждом стержне расположены обмотки соответствующей фазы и проходит магнитный поток этой фазы в крайних стержнях – потоки Φ_A и Φ_C , а в среднем стержне – поток Φ_B .

Стержни имеют ступенчатое сечение, вписываемое в круг определенного диаметра (рис. 8.3). Стержни трансформаторов большой мощности имеют много ступеней, что обеспечивает лучшее использование площади круга внутри обмотки. Для лучшей теплоотдачи иногда между отдельными пакетами стержня оставляют воздушные зазоры шириной 5..6 мм, служащие вентиляционными каналами.

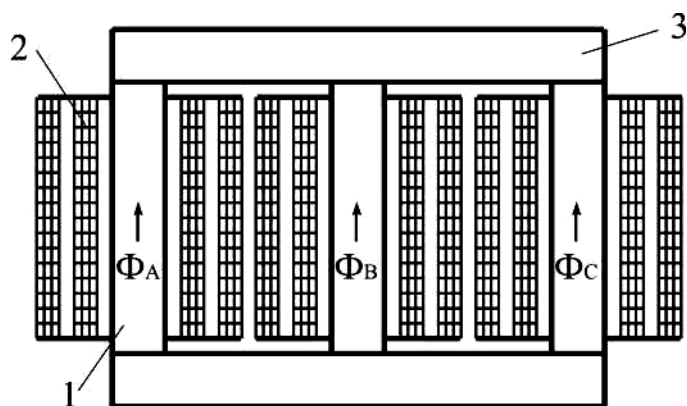


Рисунок 8.2 – Магнитопровод трёхфазного трансформатора стержневого типа с обмотками

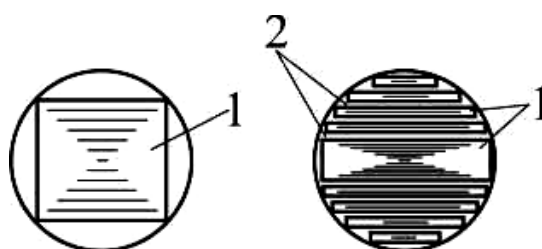


Рисунок 8.3 – Формы сечения стержней трансформаторов:
1 – пакет листов; 2 – продольные вентиляционные каналы.

Магнитопровод броневого типа представляет собой разветвленную конструкцию со стержнем и ярами, частично прикрывающими («бронирующими») обмотки. Магнитный поток в стержне магнитопровода броневого типа в два раза больше, чем в ярах, каждое из которых имеет сечение вдвое меньшее сечения стержня. Из-за технологической сложности изготовления магнитопроводы броневого типа не получили широкого распространения, их применяют лишь в трансформаторах не большой мощности (радиотрансформаторы).

В трансформаторах большой мощности применяют бронестержневую конструкцию магнитопровода (рис. 8.4), которая хотя и требует несколько повышенного расхода электротехнической стали, но позволяет уменьшить высоту магнитопровода, а, следовательно, и высоту трансформатора. Это имеет важное значение при транспортировке трансформаторов по железной дороге.

По способу сочленения стержней с ярами различают стыковую и шихтованную конструкции стержневого магнитопровода.

При стыковой конструкции стержни и яра собирают отдельно, насаживают обмотки на стержни, а затем приставляют верхнее и нижнее яра, заранее проложив изолирующие прокладки между стыкующими элементами, с целью ослабления вихревых токов, возникающих при взаимном перекрытии листов стержней и ярм. После установки двух ярм всю конструкцию прессуют и стягивают вертикальными шпильками. Стыковая конструкция хотя и облегчает сборку магнитопровода, но не получила распространения в силовых трансформаторах из-за громоздкости стяжных

устройств и необходимости механической обработки стыкующихся поверхностей для уменьшения магнитного сопротивления в месте стыка.

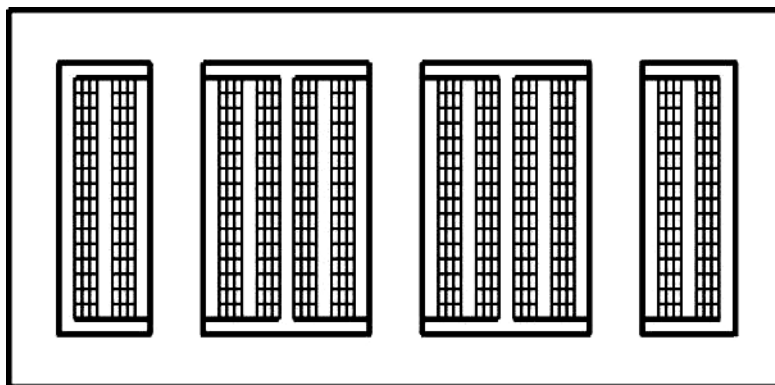


Рисунок 8.4 – Бронестержневая конструкция магнитопровода

При шихтованной конструкции магнитопроводов силовых трансформаторов стержни и ярма собирают слоями в переплет. Обычно слои содержат 2...3 листа. В настоящее время магнитопроводы силовых трансформаторов изготавливают из холоднокатаной электротехнической стали, у которой магнитные свойства вдоль направления прокатки листов лучше, чем поперек. Поэтому при шихтованной конструкции в местах поворота листов на 90° появляются «зоны несовпадения» направления прокатки с направлением магнитного потока. На этих участках наблюдаются увеличение магнитного сопротивления и рост магнитных потерь. С целью ослабления этого явления применяют для шихтовки пластины (полосы) со скошенными краями. В этом случае вместо прямого стыка получают косой стык, у которого «зона несовпадения» гораздо меньше. Недостатком магнитопроводов шихтованной конструкции является некоторая сложность сборки, так как для насадки обмоток на стержни приходится расшихтовывать верхнее ярмо, а затем после насадки обмоток вновь его зашихтовывать.

Стержни магнитопроводов во избежание распушения спрессовывают (скрепляют). Делают это обычно наложением на стержень бандажа из стеклоленты или стальной проволоки. Стальной бандаж выполняют с изолирующей пряжкой, что исключает создание замкнутых стальных витков на стержнях. Бандаж накладывают равномерно, с определенным натягом. Для опрессовки ярм и мест их сочленения со стержнями используют ярмовые балки, которые в местах, выходящих за крайние стержни, стягивают шпильками. Во избежание возникновения разности потенциалов между металлическими частями во время работы трансформатора, что может вызвать пробой изоляционных промежутков, разделяющих эти части, магнитопровод и детали его обязательно заземляют. Заземление осуществляют медными лентами, вставляемыми между стальными пластинами магнитопровода одними концами и прикрепляемыми к ярмовым балкам другими концами.

Магнитопроводы трансформаторов малой мощности (обычно более 1 кВ·А) чаще всего изготавливают из узкой ленты электротехнической холоднокатаной стали путем навивки. Такие магнитопроводы делают разрезными, а после насадки обмоток собирают встык и стягивают специальными хомутами.

Обмотки трансформаторов средней и большой мощности выполняют из алюминиевых или медных обмоточных проводов круглого или прямоугольного сечения, изолированных хлопчатобумажной пряжей или кабельной бумагой. Основой обмотки в большинстве случаев является бумажно-бакелитовый цилиндр, на котором крепятся элементы (рейки, угловые шайбы и т. п.), обеспечивающие обмотке механическую и электрическую прочность.

По взаимному расположению на стержне обмотки разделяют на концентрические и чередующиеся. Концентрические обмотки выполняют в виде цилиндров, размещаемых на стержне концентрически: ближе к стержню обычно располагают обмотку НН (требующую меньшей изоляции от стержня), а снаружи (рис. 8.5, а) – обмотку ВН.

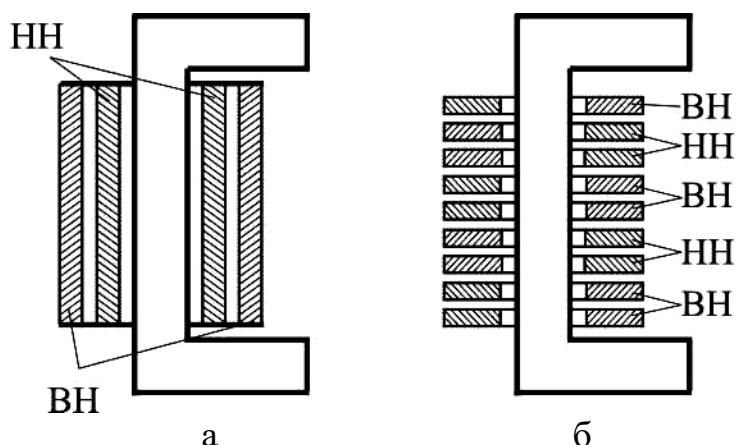


Рисунок 8.5 – Концентрическая (а) и дисковая (б) обмотки

Чередующиеся (дисковые) обмотки трансформаторов выполняют в виде отдельных секций (дисков) НН и ВН и располагают на стержне в чередующемся порядке (рис. 8.5, б). Чередующиеся обмотки применяют весьма редко, лишь в некоторых трансформаторах специального назначения.

Концентрические обмотки в конструктивном отношении разделяют на несколько типов. Рассмотрим некоторые из них.

Цилиндрические однослойные или двухслойные обмотки из провода прямоугольного сечения используют главным образом в качестве обмоток НН. При этом витки укладывают по винтовой линии, имеющей один или несколько ходов. Для того чтобы все параллельные проводники одинаково нагружались током, выполняют транспозицию (перекладку) этих проводников. При транспозиции стремятся, чтобы в пределах одного витка каждый проводник занимал все положения. Транспозиция может быть групповой, когда параллельные провода делятся на две группы и

перестановка осуществляется группами, и общей, когда меняется взаимное расположение всех параллельных проводов.

Непрерывные обмотки состоят из отдельных дисковых обмоток (секции), намотанных по спирали и соединенных между собой без пайки, т. е. выполненных «непрерывно». Если обмотка выполняется несколькими параллельными проводами, то в ней применяют транспозицию проводов. Непрерывные обмотки, несмотря на некоторую сложность изготовления, получили наибольшее применение в силовых трансформаторах как в качестве обмоток ВН, так и в качестве обмоток НН. Это объясняется их большой механической прочностью и надежностью.

В трансформаторах с масляным охлаждением магнитопровод с обмотками помещен в бак, наполненный трансформаторным маслом. Трансформаторное масло, омывая обмотки и магнитопровод, отбирает от них тепло и, обладая более высокой теплопроводностью, чем воздух, через стенки бака и трубы радиатора отдает ее в окружающую среду. К тому же трансформаторное масло обеспечивает дополнительную изоляцию обмоток, так как электрическая прочность масла намного больше чем у воздуха.

Масляное охлаждение интенсивнее воздушного, поэтому габариты и вес масляных трансформаторов меньше, чем у сухих трансформаторов такой же мощности.

В трансформаторах мощностью до 20...30 кВ·А применяют баки с гладкими стенками. У более мощных трансформаторов для увеличения охлаждаемой поверхности стенки бака делают ребристыми или же применяют трубчатые баки. Масло, нагреваясь, поднимается вверх, а охлаждаясь, опускается вниз. При этом масло циркулирует в трубах, что способствует более быстрому его охлаждению.

Для компенсации объема масла при изменении температуры, а также для защиты масла от окисления и увлажнения при контакте с воздухом в трансформаторах применяют расширитель, представляющий собой цилиндрический сосуд, установленный на крышке бака и сообщающийся с ним. Колебания уровня масла с изменением его температуры происходят не в баке, который всегда заполнен маслом, а в расширителе, сообщаемом с атмосферой. На расширителе устанавливают воздухоочистительный фильтр (воздухоосушитель). Воздухоосушитель представляет собой трубу с масляным затвором, заполненную сорбентом (цеолитом). При понижении уровня масла в расширителе засасываемый воздух проходит через масляный затвор, очищаясь от взвешенных примесей, и через сорбент, поглощающий влагу. Контроль за воздухоосушителем в эксплуатации заключается в наблюдении за окраской селикагеля-индикатора, который изначально имеет ярко-голубую окраску.

В процессе работы трансформаторов не исключена возможность возникновения в них явлений, сопровождающихся бурным выделением газов, что ведет к значительному увеличению давления внутри бака, поэтому во избежание повреждения баков трансформаторы мощностью 1000 кВ·А и выше снабжают выхлопной трубой, которую устанавливают на крышке бака.

Нижним концом труба сообщается с баком, а ее верхний конец заканчивается фланцем, на котором укреплен стеклянный диск. При давлении, превышающем безопасное для бака, стеклянный диск ломается и газы выходят наружу.

В трубопровод, соединяющий бак масляного трансформатора с расширителем, помещено газовое реле. При возникновении в трансформаторе значительных повреждений, сопровождаемых обильным выделением газов (например, при коротком замыкании между витками обмоток), газовое реле срабатывает и замыкает контакты цепи управления выключателя, который отключает трансформатор от сети. Обмотки трансформатора с внешней цепью соединяют вводами. В масляных трансформаторах для вводов обычно используют проходные фарфоровые изоляторы. Такой ввод снабжен металлическим фланцем, посредством которого он крепится к крышке или стенке бака. Ко дну бака прикреплена тележка, позволяющая перемещать трансформатор в пределах подстанции. На крышке бака расположена рукоятка переключателя напряжений.

Свойства трансформатора определяются его номинальными параметрами:

- номинальное первичное линейное напряжение $U_{1НОМ}$, В или кВ;
- номинальное вторичное линейное напряжение $U_{2НОМ}$ (напряжение на выводах вторичной обмотки при отключенной нагрузке и номинальном первичном напряжении), В или кВ;
- номинальные линейные токи в первичной $I_{1НОМ}$ и вторичной $I_{2НОМ}$ обмотках, А;
- номинальная полная мощность $S_{НОМ}$, кВ·А

$S_{НОМ} = U_{1НОМ} \cdot I_{1НОМ}$ – для однофазного трансформатора;

$S_{НОМ} = \sqrt{3} \cdot U_{1НОМ} \cdot I_{1НОМ}$ – для трехфазного трансформатора.

Номинальные линейные токи вычисляют по номинальной мощности трансформатора.

Для трехфазного трансформатора:

$$I_{1\text{л}} = \frac{S_{\text{л}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{л}}}, \quad I_{2\text{л}} = \frac{S_{\text{л}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{л}}},$$

где $S_{НОМ}$ – номинальная мощность трехфазного трансформатора, кВ·А; U – номинальные напряжения, кВ.

Каждый трансформатор рассчитан для включения в сеть переменного тока определенной частоты. В России трансформаторы общего назначения рассчитаны на частоту $f = 50$ Гц (в некоторых других странах $f = 60$ Гц), в устройствах автоматики и связи применяют трансформаторы на частоты 50, 400 или 1000 Гц.

На рисунке 8.6 изображен трехфазный трансформатор.

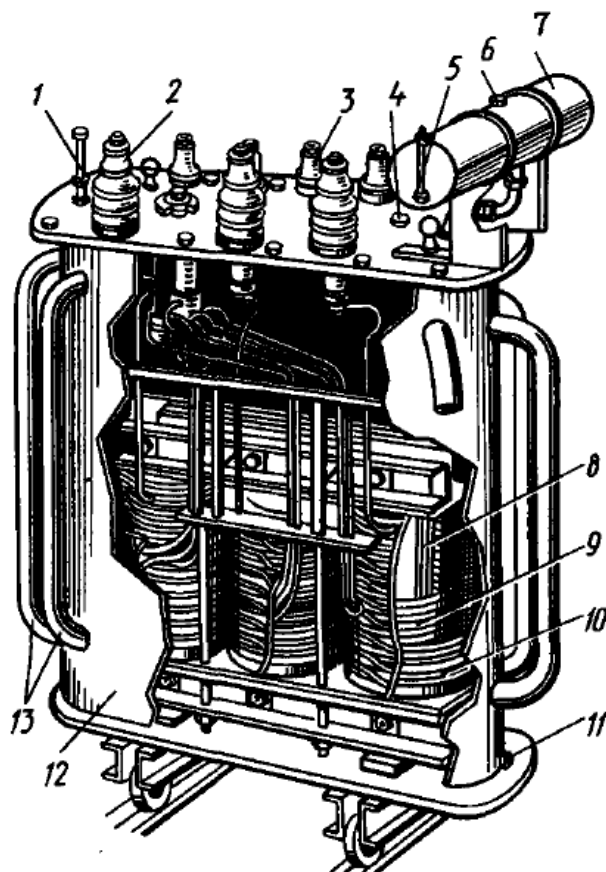


Рисунок 8.6 – Устройство трехфазного средней мощности:

1 – термометр; 2 – выводы обмотки ВН; 3 – выводы обмотки НН; 4, 6 – пробки для заливки масла; 5 – указатель уровня масла; 7 – расширитель; 8 – магнитопровод; 9 – обмотка НН; 10 – обмотка ВН; 11 – пробка для спуска масла; 12 – бак для масла; 13 – трубы для охлаждения масла.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.
3. Краткие ответы на контрольные вопросы.
4. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каков принцип работы трансформатора?
2. Где применяются силовые трансформаторы?
3. Из каких частей состоит простейший силовой трансформатор?
4. По каким признакам классифицируют трансформаторы?
5. Почему трансформаторы не работают от сети постоянного тока?
6. Какие функции выполняет в трансформаторе магнитопровод?
7. Какие типы магнитопроводов силовых трансформаторов вы знаете? В чем их отличие?
8. Зачем магнитопровод и детали его крепления заземляют?
9. Какие виды обмоток трансформатора вы знаете? В чем их отличие?

10. В чем преимущество масляного охлаждения перед воздушным?
11. Перечислите основные элементы конструкции трансформатора с масляным охлаждением.
12. Какими параметрами определяются свойства трансформатора?
13. На какую частоту рассчитаны трансформаторы общего назначения в России?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ В ОДНОФАЗНОМ И КОНДЕНСАТОРНОМ РЕЖИМАХ

Цель работы:

Ознакомиться со схемами подключения трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети, с порядком пуска, степенью использования номинальной мощности.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить конструкцию и принцип работы трехфазного асинхронного двигателя.
2. Изучить основные теоретические сведения работы трехфазного асинхронного двигателя в различных режимах.
3. Собрать электрические схемы.
4. Провести соответствующие измерения.
5. Выполнить расчеты и построить графики.
6. Рассчитать и выбрать рабочий и пусковой конденсатор для заданного трехфазного асинхронного двигателя
7. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Трехфазный асинхронный двигатель нормального исполнения может создавать вращающий момент без принятия специальных мер при питании от сети однофазного тока.

Предположим, что цепь одного из проводов работающего двигателя, присоединенного к трехфазной сети, разомкнулась (например, вследствие перегорания плавкой вставки предохранителя). Машина, оказавшаяся в однофазном режиме с последовательным или последовательно-параллельным соединением обмоток статора, будет продолжать вращаться, преодолевая момент сопротивления нагрузки. В первом случае одна фаза полностью теряет питание, во втором происходит уменьшение напряжения на каждой из двух фаз, соединенных последовательно. Частота вращения двигателя при этом в обоих случаях снижается, а скольжение увеличивается.

Увеличение скольжения при неизменной нагрузке на валу сопровождается значительным возрастанием тока. Для предупреждения чрезмерного перегрева обмоток необходимо снизить нагрузку двигателя до

50-60 % номинальной. Остановив трехфазный двигатель, работающий в однофазном режиме, легко убедиться в том, что пустить его в ход непосредственно включением в сеть однофазного тока невозможно. Вращающий момент при пуске оказывается равным нулю. Это обусловлено характером магнитного поля статора, которое в однофазном режиме является пульсирующим.

Пульсирующее поле может быть представлено в виде двух полей, вращающихся с одной и той же синхронной частотой в противоположные стороны. Наибольшее значение (амплитуда) каждого из них равно половине амплитуды пульсирующего поля. Каждое из вращающихся полей наводит в обмотке ротора ЭДС, под влиянием которых возникают токи. Взаимодействие вращающихся полей с токами ротора приводит к образованию вращающихся моментов, направленных в противоположные стороны. Неподвижный ротор по отношению к этим полям находится в одинаковых условиях, поэтому вращающие моменты полностью уравниваются друг друга, этим и объясняется то обстоятельство, что трехфазный двигатель в однофазном режиме не имеет начального (пускового) момента.

Прямое поле, т. е. поле, направление вращения которого совпадает с направлением вращения ротора, наводит в его обмотке токи небольшой частоты ($2\div 3$ Гц при частоте напряжения сети 50 Гц). Обозначим момент, обусловленный прямым полем, через $M_{\text{пр}}$, тогда встречному (обратному) полю соответствует тормозной момент $M_{\text{обр}}$. Токи, индуктированные в обмотке ротора встречным полем, при малых значениях скольжения имеют повышенную частоту (около 100 Гц) и поэтому, становясь почти чисто реактивными, оказывают размагничивающее действие. Ослабление встречного поля вызывает уменьшение тормозного момента $M_{\text{обр}}$. Результирующий момент однофазного двигателя равен разности моментов от прямого и обратного полей и больше нуля.

Наличие тормозного момента приводит к ухудшению характеристик двигателя в однофазном режиме: по сравнению с трехфазным двигатель имеет меньшие КПД и коэффициент мощности.

Уменьшение КПД связано с возрастанием потерь, обусловленных появлением обратного поля. Снижение коэффициента мощности объясняется увеличением намагничивающего тока.

Как уже отмечалось, существенным недостатком трехфазного двигателя при однофазном включении является отсутствие пускового момента. Двигатели малой мощности можно пустить в ход «от руки», но этот способ неприменим для более мощных приводов.

Для получения кругового вращающегося поля необходимо, чтобы МДС обмоток были равны по значению, сдвинуты в пространстве и во времени на 90° .

Для получения сдвига МДС, создаваемых токами обмоток во времени, в цепь пусковой обмотки включают активное сопротивление, индуктивное сопротивление или конденсатор. В первом и втором случаях создается

эллиптическое вращающееся поле, которое вызывает вибрацию ротора. Однако к достоинству этих способов пуска относятся простота и относительно невысокая стоимость пусковых элементов.

Если в качестве фазосдвигающего элемента использовать конденсатор, то можно получить вращающееся магнитное поле, близкое к круговому, а в некоторых случаях и круговое, что позволяет уменьшить момент сопротивления, вызванный обратным полем. Такой двигатель называется конденсаторным.

Сравнение различных способов пуска показало, что пусковой ток для одного и того же значения момента получается наименьшим при пуске с помощью включения конденсатора. С уменьшением пускового тока уменьшаются колебания напряжения в линии, что приводит к улучшению условий пуска.

Для одинаковых пусковых токов начальный вращающий момент двигателя с конденсатором в цепи пусковой обмотки значительно превосходит момент, получаемый при включении активного сопротивления или индуктивности.

Если принять за 100 % мощность трехфазного двигателя, обозначенную на его щитке, то при однофазном включении двигатель может развить 50-70 % этой мощности, а при использовании в качестве конденсаторного - 70-85 % и более. Еще одно преимущество конденсаторного двигателя заключается в том, что отсутствует специальное пусковое устройство, которое необходимо при однофазной схеме для отключения пусковой обмотки после разгона двигателя.

Для работы трехфазного асинхронного двигателя необходимо правильно рассчитать емкость пускового и рабочего конденсаторов или величину активного сопротивления. В зависимости от количества выводов трехфазной обмотки существует несколько схем включения двигателя (рис. 9.1).

Схему включения на рисунках надо выбирать с учетом напряжения сети и номинального напряжения двигателя. Например, при трех выведенных концах обмотки статора (рис. 9.1, а, в, д) двигатель может быть использован в сети, напряжение которой равно номинальному напряжению двигателя. При шести выводных концах обмотки двигатель имеет два номинальных напряжения: 127/220 В, 220/380 В. Если напряжение сети равно большему номинальному напряжению двигателя, т.е. $U_C = 220$ В при номинальном напряжении 127/220 В или $U_C = 380$ В при номинальном напряжении 220/380 В и т.д., то надо пользоваться схемами, приведенными на рис. 9.1, б, г. При напряжении сети, равном меньшему номинальному напряжению двигателя, следует применять схему, показанную на рис. 9.1, е.

Рабочая емкость $C_{РАБ}$ (мкФ) для каждой схемы должна иметь определенное значение и может быть подсчитана, исходя из напряжения однофазной сети U_C и номинального тока I_ϕ в фазе трехфазного двигателя:

$$\tilde{N}_{D\Delta\Delta} = k \cdot \frac{I_{\dot{\phi}}}{U_C}, \text{ мкФ}, \quad (9.1)$$

где k – коэффициент, зависящий от схемы включения (для в, г рисунка 9.1 – 2800, д – 4800, е – 1600)

Емкость пускового конденсатора определяется:

$$\tilde{N}_{\dot{I}ON\dot{E}} = (2,5 \div 3) \cdot \tilde{N}_{D\Delta\Delta}, \text{ мкФ}. \quad (9.2)$$

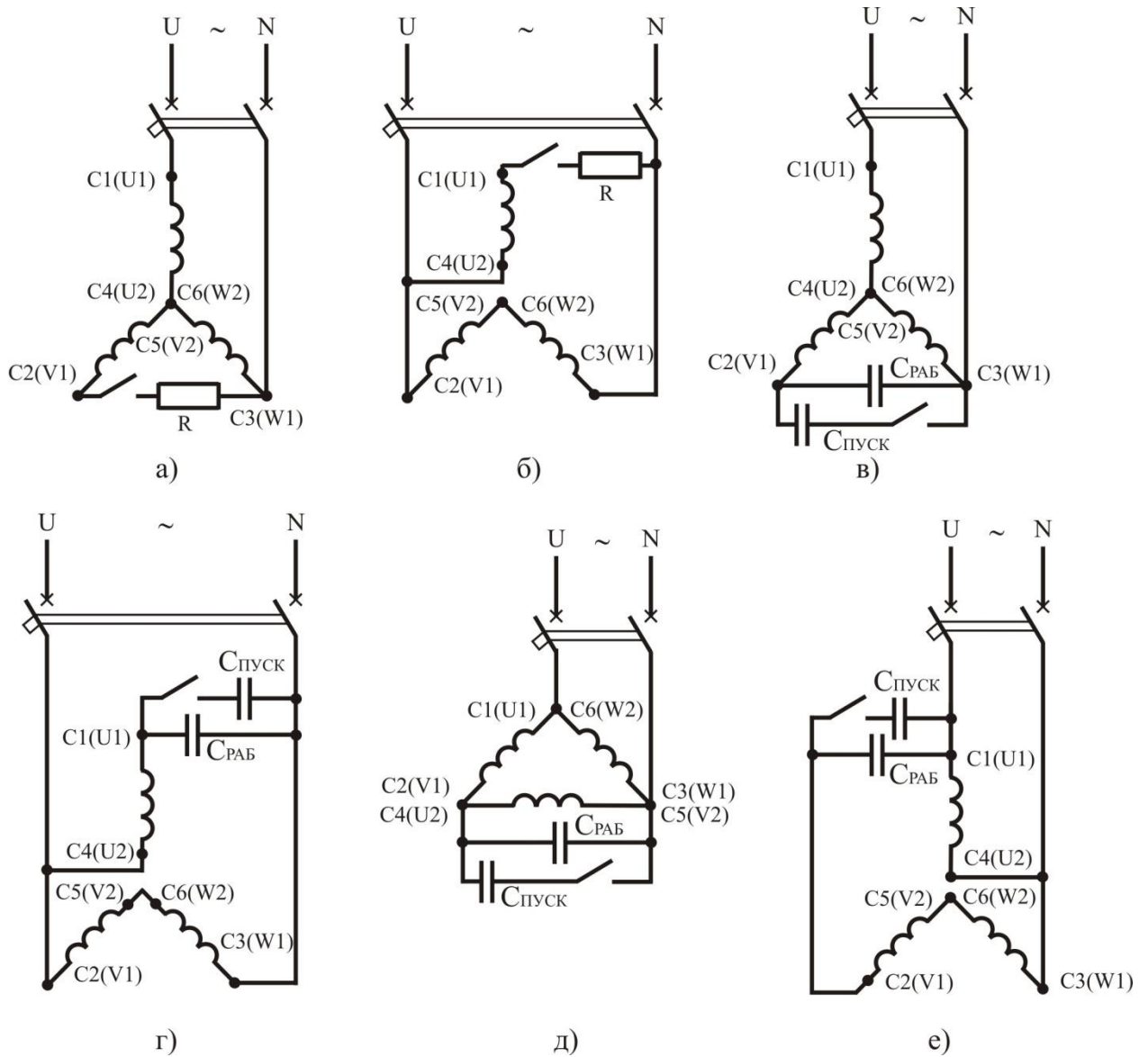


Рисунок 9.1 – Схемы включения трехфазного электрического двигателя в однофазную сеть

Напряжение на конденсаторе U_K также зависит от схемы включения и напряжения сети. Для схем в, д – $1,15 \cdot U_C$, е – $2,2 \cdot U_C$, г – $1,3 \cdot U_C$. Технические характеристики некоторых конденсаторов приведены в таблице 9.1.

Следует читать марку конденсатора следующим образом: МБ – металлобумажный; Г – герметичный; М – малогабаритный; Ц – цилиндрический; К – конденсатор постоянной емкости Ч – частотный.

Номинальное напряжение конденсатора должно быть равно или несколько больше расчетного значения.

Необходимо помнить, что конденсаторы после отключения длительное время сохраняют напряжение на своих зажимах и создают при прикосновении к ним опасность поражения человека электрическим током. Опасность поражения тем выше, чем больше емкость и выше напряжение на включенном в схему конденсаторе. При ремонте или отладке двигателя необходимо после каждого отключения конденсатор разрядить. Для защиты от случайного прикосновения в процессе эксплуатации двигателя конденсаторы должны быть жестко закреплены и ограждены.

Таблица 9.1 – Технические характеристики конденсаторов

Тип конденсатора	Емкость, мкФ	Номинальное напряжение, В	Тип конденсатора	Емкость, мкФ	Номинальное напряжение, В
МБГ	25	200	МБГТ	10	300, 50, 750
	10	400	МБГЧ	1	250, 280, 1000
	4	600		2	750
МБГО	30	160, 300	МБМЦ	4	500
	20	400, 500		10	250
	10	600	МБМЦ	1	200, 400
МБГО-2	10	300	К72-11	1	500

Пусковое сопротивление R включается вместо пусковых конденсаторов, величину сопротивления определяют опытным путем, используя регулируемое (реостат) или по формуле:

$$R = \frac{0,86 \cdot U_c}{k_I \cdot I_\delta}, \text{ Ом}, \quad (9.3)$$

где k_I – кратность пускового тока электродвигателя в трехфазном режиме.

МЕТОДИКА ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с паспортными данными трехфазного асинхронного электродвигателя. Заполнить таблицу 9.2.

Таблица 9.2 – Паспортные данные трехфазного асинхронного электродвигателя

ТИП	$P_{НОМ}$, Вт	Схема соединения обмоток	$I_{НОМУ}/I_{НОМ\Delta}$, А	$U_{НОМУ}/U_{НОМ\Delta}$, В	$n_{НОМ}$, об/мин

2. Собрать схему (рис. 9.2) для изучения работы трехфазного асинхронного электродвигателя в различных режимах.

3. Установить переключатель QS в положение 1 – трехфазный режим. Включить автоматический выключатель QF. Постепенно нагружая двигатель

электромагнитным тормозом ЭМТ, записывают в таблицу 9.3 несколько значений тока примерно через равные интервалы ($I = I_{X.X.}$; $I = 0,5 \cdot I_{НОМ}$, $I = 0,75 \cdot I_{НОМ}$, $I = I_{НОМ}$, $I = 1,2 \cdot I_{НОМ}$).

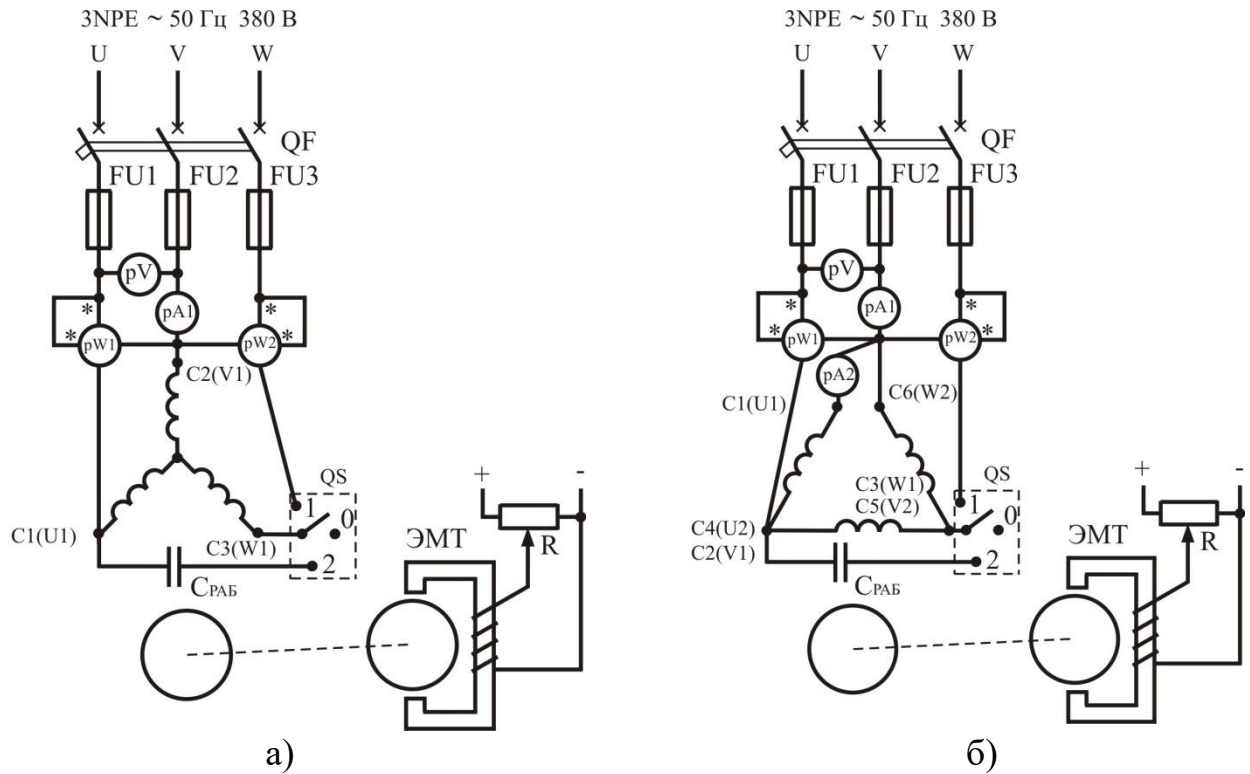


Рисунок 9.2 – Схемы подключения трехфазного асинхронного двигателя к однофазной сети при соединении обмоток «звезда» (а) и «треугольник» (б)

Таблица 9.3 – Данные опыта

Режим работы	Номер опыта	Измерения							Вычисления			
		$U, В$	$I, А$	$I_{\phi}, А$	$P_{P_{W1}}, Вт$	$P_{P_{W2}}, Вт$	$n_2, об/мин$	$M, Н \cdot м$	$P_1, Вт$	$P_2, Вт$	$\cos \varphi_1$	$\eta, \%$
Трёхфазный	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
Однофазный	1											
	2											
	3											
	4											
	5											
Конденсаторный	1											
	2											
	3											
	4											
	5											

Потребляемая мощность P_1 определяется как сумма показаний ваттметров PW1 и PW2.

4. Выполнить расчеты, данные занести в таблицу 9.3.

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = \frac{D_1}{3 \cdot U_1 \cdot I_0} \quad (9.4)$$

Полезная мощность двигателя

$$D_2 = 0,105 \cdot \dot{I}_2 \cdot n_2, \text{ Вт.} \quad (9.5)$$

КПД двигателя

$$\eta_2 = \frac{D_2}{D_1} \cdot 100, \%. \quad (9.6)$$

5. Для исследования двигателя в однофазном режиме необходимо переключить QS в положение 2, включить автоматический выключатель QF и после пуска перевести в нейтральное положение. Двигатель будет работать как однофазный.

Постепенно нагружая двигатель электромагнитным тормозом ЭМТ, записывают в таблицу 9.3 несколько значений тока примерно через равные интервалы ($I = I_{X.X}; I = 0,5 \cdot I_{НОМ}, I = 0,75 \cdot I_{НОМ}, I = I_{НОМ}, I = 1,2 \cdot I_{НОМ}$).

Коэффициент мощности

$$\cos \varphi_1 = \frac{D_1}{U_1 \cdot I_1} \quad (9.7)$$

P_1 определяется по показанию ваттметра PW1, а I_1 – ток в линейном проводе.

Полезную мощность двигателя и КПД определяют по (9.5 и 9.6).

6. Для исследования двигателя в конденсаторном режиме необходимо переключить QS в положение 2, включить автоматический выключатель QF. Повторить порядок проведения опыта (п. 5).

7. По данным таблицы 9.3 построить рабочие характеристики для трех режимов работы $P_2, \cos \varphi_1, n_2, \eta = f(I_\phi)$. Для удобства графики одноименных (сравниваемых) величин трех режимов строят в одних осях координат.

8. Выбрать рабочую емкость для заданного преподавателем двигателя (табл. 9.4). Напряжение сети 220 В.

Таблица 9.4 – Паспортные данные трехфазного асинхронного электродвигателя

№ п.п.	ТИП	$P_{НОМ},$ Вт	Схема соединения обмоток	$I_{НОМ\Delta}/I_{НОМУ},$ А	$U_{НОМ\Delta}/U_{НОМУ},$ В	$n_{НОМ},$ об/мин	$\eta, \%$	$\cos \varphi$
1	АИР56В2	0,25	Δ/Y	0,70	220/380	2730	69	0,79
2	АИР63А2	0,37	Δ/Y	0,91	127/220	2730	72	0,86
3	АИР63В2	0,55	Δ/Y	1,31	220/380	2730	75	0,85
4	АИР71А2	0,75	Δ/Y	1,75	220/380	2820	79	0,80
5	АИР56А4	0,12	Δ/Y	0,44	127/220	1350	63	0,66
6	АИР56В4	0,18	Δ/Y	0,63	127/220	1350	64	0,68

7	АИР63А4	0,25	Δ/Y	0,83	220/380	1320	68	0,67
8	АИР63В4	0,37	Δ/Y	1,18	220/380	1320	68	0,70
9	АИР80А4	1,1	Δ/Y	2,75	220/380	1395	76	0,77

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Электрическая схема испытания трехфазного двигателя.
3. Результаты проведенных опытов, построенные характеристики.
4. Краткие ответы на контрольные вопросы.
5. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Устройство и принцип действия однофазного и трехфазного асинхронного двигателя.
2. Какие фазосдвигающие устройства применяются для пуска трехфазного двигателя в однофазном режиме?
3. Приведите принципиальные электрические схемы пуска трехфазного двигателя в однофазном режиме.
4. Какие типы конденсаторов применяются при пуске асинхронного двигателя.
5. Как увеличить пусковой момент у однофазного двигателя?
6. Какой режим работы асинхронного двигателя наилучший?
7. Как подобрать ёмкость конденсаторов?
8. Как подобрать напряжение на конденсаторе?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 10 СИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Цель работы:

Ознакомиться с устройством, принципом действия, назначением синхронных машин.

Порядок выполнения работы:

Изучить основные теоретические сведения, составить отчет по работе, ответить на контрольные вопросы.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Синхронные машины используют главным образом в качестве источников электрической энергии переменного тока. Их устанавливают на мощных тепловых, гидравлических и атомных электростанциях, а также на

передвижных электростанциях и транспортных установках (тепловозах, автомобилях, самолетах).

Синхронные машины широко используют и в качестве электродвигателей при мощности 100 кВт и выше для привода насосов, компрессоров, вентиляторов и других механизмов, работающих при постоянной частоте вращения. Для генерирования или потребления реактивной мощности с целью улучшения коэффициента мощности сети и регулирования ее напряжения применяют синхронные компенсаторы.

В электробытовых приборах (магнитофонах, проигрывателях, киноаппаратуре) и системах управления широко применяются различные синхронные микромашины – с постоянными магнитами, индукторные, реактивные, гистерезисные, шаговые.

В 1876 г. русский ученый П. Н. Яблочков разработал несколько образцов многофазных синхронных генераторов с электромагнитным возбуждением и электрически не связанными фазами, предназначенных для питания созданных им дуговых электрических ламп (свечи Яблочкова). Первый трехфазный синхронный генератор изобрел известный русский электротехник М. О. Доливо-Добровольский. Этот генератор имел мощность 230 кВт·А, приводился во вращение от гидротурбины.

Основная электромагнитная схема синхронных машин с тех пор оставалась неизменной, но усовершенствовалось их конструктивное выполнение и возросли электромагнитные нагрузки, что позволило значительно улучшить массогабаритные и энергетические показатели и нагрузочную способность синхронных машин. Особенно большие выгоды в этом отношении дало применение в крупных машинах водородного и водяного охлаждения.

В разработке теории синхронных машин и совершенствовании их конструкции важная роль принадлежит советским ученым А. Е. Алексееву, А. А. Гореву, Р. А. Лютеру, М. П. Костенко, В. А. Толвинскому и др. Синхронные генераторы большой мощности разрабатывались на основе работ А. И. Бертинова, А. И. Глебова, Д. Е. Ефремова, В. В. Романова, И. Д. Урусова, Г. М. Хуторецкого и др.

В настоящее время Российской электропромышленностью для тепловых и атомных электростанций разработана и выпускается серия унифицированных турбогенераторов мощностью 63, 125, 320, 500 и 800 МВт и уникальные турбогенераторы мощностью 1000 МВт для атомных и 1200 МВт для тепловых электростанций. Для гидроэлектростанций созданы гидрогенераторы мощностью 350, 590 и 640 МВт, а также обратимые генераторы-двигатели для гидроаккумулирующих электростанций мощностью 200...300 МВт. Для высоковольтных линий электропередачи выпускаются синхронные компенсаторы мощностью до 350 МВА. Планируется начать разработки турбогенераторов мощностью 1600...2000 МВт и гидрогенераторов мощностью 1000 МВт.

Принцип действия заключается в следующем. На статоре 1 синхронной машины (рис. 10.1, а) расположена трехфазная обмотка 3. Обмотку ротора 4,

питаемую от источника постоянного тока, называют обмоткой возбуждения, так как она создает в машине магнитный поток возбуждения. Вращающуюся обмотку ротора соединяют с внешним источником постоянного тока посредством контактных колец 5 и щеток 6 (рис. 10.1, б). При вращении ротора 2 с некоторой частотой n_2 поток возбуждения пересекает проводники обмотки статора и индуцирует в ее фазах переменную ЭДС E , изменяющуюся с частотой:

$$f_1 = \frac{p_2 \cdot n_2}{60}, \text{ Гц,} \quad (10.1)$$

где p_2 – количество пар полюсов ротора.

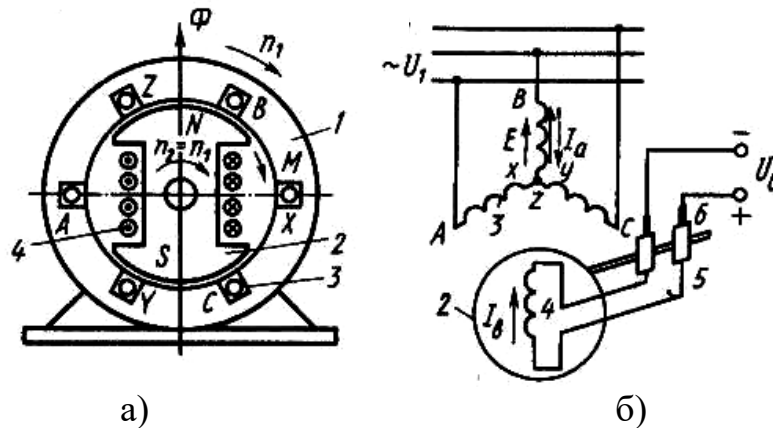


Рисунок 10.1 – Электромагнитная схема синхронной машины (а) и схема ее включения (б)

Если обмотку статора подключить к какой-либо нагрузке, то проходящий по этой обмотке многофазный ток I_a создает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого

$$n_1 = \frac{60 \cdot f_1}{p_1}, \quad (10.2)$$

где p_1 – количество пар полюсов статора.

Так как p_1 всегда равно p_2 из (10.1) и (10.2) следует, что $n_1 = n_2$, т.е. ротор вращается с той же частотой, что и магнитное поле статора. Поэтому рассматриваемую машину называют синхронной. Результирующий магнитный поток Φ_{PE3} синхронной машины создается совместным действием МДС обмотки возбуждения и обмотки статора, и результирующее магнитное поле вращается в пространстве с той же частотой, что и ротор.

В синхронной машине обмотку, в которой индуцируется ЭДС и проходит ток нагрузки, называют обмоткой якоря, а часть машины, на которой расположена обмотка возбуждения, – индуктором. Для принципа действия и теории работы машины не имеет значения – вращается якорь или индуктор, поэтому в некоторых случаях применяют синхронные машины с

обращенной конструктивной схемой: обмотку якоря, к которой подключают нагрузку, располагают на роторе, а обмотку возбуждения, питаемую постоянным током, – на статоре. Такую машину называют обращенной. Обращенные машины имеют сравнительно небольшую мощность, так как у них затруднен отбор мощности от обмотки ротора из-за наличия колец и щеток.

Синхронная машина может работать автономно в качестве генератора, питающего подключенную к ней нагрузку, или параллельно с сетью, к которой присоединены другие генераторы. При работе параллельно с сетью она может отдавать или потреблять электрическую энергию, т. е. работать генератором или двигателем. При подключении обмотки статора к сети с напряжением U и частотой f_1 проходящий по обмотке ток создает так же, как в асинхронной машине, вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется по (10.2). В результате взаимодействия этого поля с током возбуждения I_B , проходящим по обмотке ротора, создается электромагнитный момент M , который при работе машины в двигательном режиме является вращающим, а при работе в генераторном режиме – тормозным. В рассматриваемой машине поток возбуждения (холостого хода) создается обмоткой постоянного тока, расположенной обычно на роторе. В установившемся режиме ротор неподвижен относительно магнитного поля и вращается с частотой вращения $n_1 = n_2$ независимо от механической нагрузки на валу ротора или электрической нагрузки.

Устройство синхронной машины. Синхронные машины выполняют с неподвижным или вращающимся якорем. Машины большой мощности для удобства отвода электрической энергии со статора или подвода ее выполняют с неподвижным якорем (рис. 10.2, а). Поскольку мощность возбуждения невелика по сравнению с мощностью, снимаемой с якоря (0,3...2 %), подвод постоянного тока к обмотке возбуждения с помощью двух колец не вызывает особых затруднений. Синхронные машины небольшой мощности выполняют как с неподвижным, так и с вращающимся якорем. В обращенной синхронной машине с вращающимся якорем и неподвижным индуктором (рис. 10.2, б) нагрузка подключается к обмотке посредством трех колец.

В синхронных машинах применяют две различные конструкции ротора: неявнополюсную – с неявно выраженными полюсами (рис. 10.3, а) и явнополюсную – с явно выраженными полюсами (рис. 10.3, б).

Двух- и четырехполюсные машины большой мощности, работающие при частоте вращения ротора 1500 и 3000 об/мин, изготавливают, как правило, с неявнополюсным ротором. Применение в них явнополюсного ротора невозможно по условиям обеспечения необходимой механической прочности крепления полюсов и обмотки возбуждения. Обмотку возбуждения в такой машине размещают в пазах сердечника ротора, выполненного из массивной стальной поковки, и укрепляют немагнитными клиньями.

Явнополюсный ротор обычно используют в машинах с четырьмя полюсами и более. Обмотку возбуждения в этом случае выполняют в виде

цилиндрических катушек прямоугольного сечения, которые размещают на сердечниках полюсов и закрепляют с помощью полюсных наконечников. Ротор, сердечники полюсов и полюсные наконечники изготавливают из листовой стали.

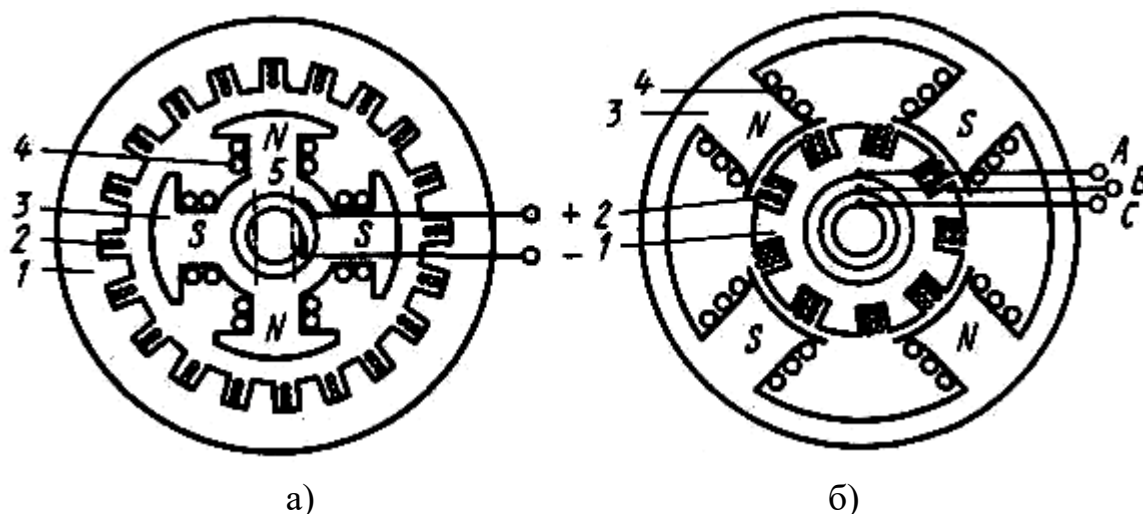


Рисунок 10.2 – Конструктивная схема синхронной машины с неподвижным (а) и вращающимся (б) якорем:

1 – якорь; 2 – обмотка якоря; 3 – полюсы индуктора; 4 – обмотка возбуждения

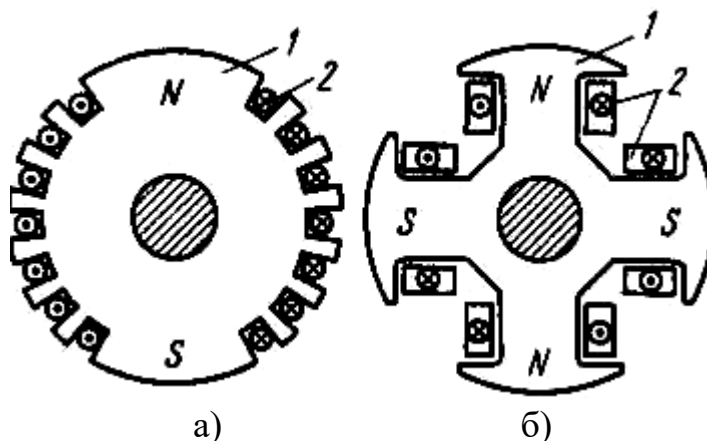


Рисунок 10.3 – Роторы синхронных неявнополюсной (а) и явнополюсной (б) машин:

1 – сердечник ротора; 2 – обмотка возбуждения

В явнополюсных машинах полюсным наконечникам обычно придают такой профиль, чтобы воздушный зазор между полюсным наконечником и статором был минимальным под серединой полюса и максимальным у его краев, благодаря чему кривая распределения индукции в воздушном зазоре приближается к синусоиде.

В полюсных наконечниках синхронных двигателей с явнополюсным ротором размещают стержни пусковой обмотки, выполненной из материала с повышенным удельным электрическим сопротивлением (латуни). Такую же обмотку (типа «белчья клетка»), состоящую из медных стержней, применяют и в синхронных генераторах; ее называют демпферной

(успокоительной) обмоткой, так как она обеспечивает быстрое затухание колебаний ротора, возникающих в переходных режимах работы синхронной машины.

В зависимости от способа питания обмотки возбуждения различают системы независимого возбуждения и самовозбуждения.

При независимом возбуждении в качестве источника для питания обмотки возбуждения служит генератор постоянного тока (возбудитель), установленный на валу ротора синхронной машины, либо отдельный вспомогательный генератор, приводимый во вращение синхронным или асинхронным двигателем. При самовозбуждении обмотка возбуждения питается от обмотки якоря через управляемый или неуправляемый выпрямитель обычно полупроводниковый.

В мощных генераторах, кроме возбудителя, обычно применяют подвозбудитель – небольшой генератор постоянного тока, служащий для возбуждения основного возбудителя. Основным возбудителем в этом случае может служить синхронный генератор совместно с полупроводниковым выпрямителем.

В современных синхронных генераторах применяют так называемую бесщеточную систему возбуждения. При этом в качестве возбудителя используют синхронный генератор, у которого обмотка якоря расположена на роторе, а выпрямитель укреплен непосредственно на валу.

Конструкция синхронного генератора определяется в основном типом привода. В зависимости от этого различают турбогенераторы, гидрогенераторы и дизель-генераторы.

Если приводом двигателей является гидравлическая турбина, то синхронный генератор называется гидрогенератором. Гидравлическая турбина обычно развивает небольшую частоту вращения (60...500 об/мин), поэтому для получения переменного тока промышленной частоты (50 Гц) в гидрогенераторах применяют ротор с большим числом полюсов. Роторы гидрогенераторов имеют явнополюсную конструкцию.

Гидрогенераторы обычно изготавливаются с вертикальным расположением вала. Гидрогенераторы выпускаются в широкой номенклатуре мощностей до 800 МВт на частоты вращения от 46,6 до 1500 об/мин, напряжением до 18 кВ. По типу гидравлической турбины гидрогенераторы делятся на вертикальные и горизонтальные, а также обратимые для работы в качестве генератора или двигателя.

Гидрогенераторы выпускаются для климатического исполнения УХЛ4, Т4 и ТВ4.

Система вентиляции гидрогенераторов, за исключением машин малой мощности, замкнутая. Гидрогенераторы большой мощности выпускаются с непосредственным водяным охлаждением обмотки статора.

Паровая турбина работает при большой частоте вращения, поэтому приводимый ею во вращение генератор, называемый турбогенератором, является быстроходной синхронной машиной. Роторы этих генераторов

выполняют либо двухполюсными ($n_1 = 3000$ об/мин), либо четырехполюсными ($n_1 = 1500$ об/мин).

В процессе работы турбогенератора на его ротор действуют значительные центробежные силы. Поэтому по условиям механической прочности в турбогенераторах применяют неявнополюсный ротор, имеющий вид удлиненного стального цилиндра с профрезерованными на поверхности продольными пазами для обмотки самовозбуждения.

Турбогенераторы и дизель-генераторы изготавливают с горизонтальным расположением вала.

Дизель-генераторы рассчитывают на частоту вращения 600...1500 об/мин и выполняют с явнополюсным ротором.

В зависимости от мощности турбогенераторы подразделяются на три основные группы: мощностью 2,5...32 МВт, 60...320 МВт и свыше 500 МВт. По частоте вращения различают турбогенераторы четырехполюсные (на частоту вращения 1500 и 1800 об/мин) и двухполюсные (на частоту вращения 3000 и 3600 об/мин) соответственно на частоты сети 50 и 60 Гц.

По виду приводной турбины турбогенераторы классифицируются на генераторы, приводимые во вращение паровой турбиной, и генераторы с приводом от газовой турбины.

По системе охлаждения турбогенераторы подразделяются на машины с воздушным, с косвенным водородным, непосредственным водородным и жидкостным охлаждением.

Большую группу синхронных машин составляют синхронные двигатели, которые обычно изготавливаются мощностью до нескольких тысяч киловатт и предназначены для привода мощных вентиляторов, мельниц, насосов и других устройств, не требующих регулирования частоты вращения.

Диапазон габаритов синхронных двигателей весьма широк: внешние диаметры сердечников статоров нарастают от 740 до 4500 мм. В настоящее время проектируют сверхмощные двигатели. Наиболее распространенные серии явнополюсных синхронных двигателей имеют следующую структуру обозначения (например СД-18-39-УХЛ4):

X – X – X – X
1 2 3 4

в которой 1 – условное название серии и номер модификации; 2 – условное обозначение габарита; 3 – длина сердечника статора, см; 4 – число полюсов.

Основные направления развития синхронных машин:

- оптимизация применения крупных электрических машин для достижения соответствия их основных параметров и характеристик реальным условиям эксплуатации;

- повышение максимальных единичных мощностей, частот вращения, степени защиты, улучшения пусковых и рабочих характеристик для экономии материалов, снижения потерь электроэнергии, повышения надежности и долговечности;

- повышение уровня автоматизации управления и обеспечения автоматического регулирования режимов работы крупных электрических

машин по заданным законам для снижения потребления электроэнергии, затрат по обслуживанию и улучшению качества выпускаемой продукции;

- создание широкой номенклатуры двигателей при максимальной унификации их конструкции и технологии изготовления напряжением 10 кВ мощностью от 500...630 кВт и выше, двигателей с полупроводниковыми системами возбуждения (статическими и бесщёточными), не требующими внешнего источника питания, и других машин, позволяющих ликвидировать лишние промежуточные звенья в преобразовании энергии.

Ведется разработка генераторов и оборудования для ветроэлектростанций и других нетрадиционных источников энергии.

Перспектива турбогенераторостроения связана с обеспечением высокого уровня надежности генераторов. Это связано с повышением долговечности отдельных узлов и деталей и улучшением показателей ремонта генераторов, с совершенствованием систем обеспечения (системы газо- и маслоснабжения, водяного хозяйства, возбуждения), широким внедрением в этих системах микропроцессорной техники и высоким уровнем автоматизации.

Принципиально новое направление в развитии турбогенераторостроения связаны с использованием явления сверхпроводимости. Применение сверхпроводимости в сочетании с беспазовой конструкцией статора дает возможность снизить массу турбогенераторов в 2...2,5 раза и одновременно повысить КПД на 0,6...0,7 %. Уже создан опытно-промышленный сверхпроводниковый турбогенератор мощностью 20 МВ·А при частоте вращения 3000 об/мин.

Перспективы развития гидрогенераторостроения. Предстоит создать уникальные типы гидрогенераторов мощностью 500... 1000 МВт в единице.

Создание новой серии гидрогенераторов небольшой мощности для использования энергоресурсов малых рек. Особенностью машин этой серии явится обеспечение их работы в полностью автоматизированном режиме.

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Дать описание основных узлов синхронных машин.
2. Вычертить электрическую схему синхронной машины.
3. Краткие ответы на контрольные вопросы.
4. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Применение синхронных машин.
2. В чем преимущества и недостатка синхронных машин перед асинхронными машинами?
3. В каких режимах могут работать синхронные машины?
4. Какие существуют способы возбуждения синхронных машин?
5. Назначение тиристорного преобразователя в системе

самовозбуждения синхронного генератора.

6. Объясните устройство явнополюсных и неявнополюсных роторов.

7. Чем объясняется неравномерный воздушный зазор в синхронной машине?

8. Есть ли перспективы развития синхронных машин?

9. Где применяются синхронные машины в сельском хозяйстве?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 11 АСИНХРОННЫЕ МАШИНЫ

Цель работы:

Ознакомиться с назначением и устройством асинхронных машин. Изучить принцип действия асинхронного двигателя и генератора. Изучить паспортные данные асинхронного двигателя.

Порядок выполнения работы:

1. Изучить принцип действия и устройство асинхронной машины.

2. Письменно оформить краткие выводы по работе.

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Асинхронные машины – это электрические машины переменного тока, у которых в установившемся режиме работы магнитное поле, участвующее в процессе преобразования энергии, и проводники, пересекающиеся этим полем, имеют разные частоты вращения.

Асинхронные машины преимущественно используют в качестве электрических двигателей. Они служат для привода различных механизмов, преобразуя электрическую энергию в механическую.

Широкое применение асинхронных двигателей объясняется их достоинствами по сравнению с другими двигателями: высокая надёжность, возможность работы непосредственно от сети переменного тока, простота конструкции и обслуживания.

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 машины малой мощности и асинхронные микромашины применяют в системах автоматики в качестве исполнительных и информационных электрических машин. Асинхронные машины служат также в качестве преобразователей частоты.

Машины мощностью больше 0,5 кВт обычно выполняются трёхфазными, а при меньшей мощности – однофазными.

Впервые конструкция трёхфазного асинхронного двигателя была разработана, создана и опробована нашим русским инженером М. О. Доливо-

Добровольским в 1889-1891 годах. Демонстрация первых двигателей состоялась на Международной электротехнической выставке во Франкфурте на Майне в сентябре 1891 года. На выставке было представлено три трёхфазных двигателя разной мощности. Самый мощный из них имел мощность 1,5 кВт и использовался для приведения во вращение генератора постоянного тока. Конструкция асинхронного двигателя, предложенная Доливо-Добровольским, оказалась очень удачной и является основным видом конструкции этих двигателей до настоящего времени.

За прошедшие годы асинхронные двигатели нашли очень широкое применение в различных отраслях промышленности и сельского хозяйства. Их используют в электроприводе металлорежущих станков, подъёмно-транспортных машин, транспортёров, насосов, вентиляторов. Маломощные двигатели используются в устройствах автоматики.

Конструктивно асинхронный двигатель состоит из неподвижного статора и размещенного внутри его вращающегося ротора. Их поверхности разделены равномерным воздушным зазором 0,2...1,5 мм.

Сердечник статора набирается из листовой электротехнической стали и запрессовывается в станину. Станина выполняется литой из немагнитного материала. Чаще всего станину выполняют из алюминия. На внутренней поверхности листов, из которых выполняется сердечник статора, имеются пазы, в которые закладывается трёхфазная обмотка. Обмотка статора выполняется в основном из изолированного медного провода круглого или прямоугольного сечения, реже – из алюминия. На рисунке 11.1 приведен разрез асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

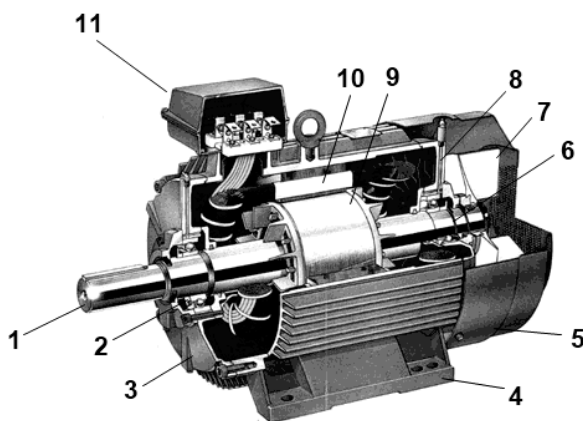


Рисунок 11.1 – Разрез асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором:

1 - вал, 2, 6 - подшипники, 3, 8 - подшипниковые щиты, 4 - лапы, 5 - кожух вентилятора, 7 - крыльчатка вентилятора, 9 - короткозамкнутый ротор, 10 - статор, 11 - коробка выводов.

Обмотка статора состоит из трёх отдельных частей, называемых фазами. Начала фаз обозначаются С1, С2, С3, концы – С4, С5, С6. Для двигателей выпускаемых с 1987 года обозначение начал и концов фаз обмоток изменилось: U1-U2, V1-V2, W1-W2.

Начала и концы фаз выведены в коробку выводов (рис. 11.2, а), закреплённый на станине. Обмотка статора может быть соединена по схеме звезда или треугольник (рис. 11.2, б). Выбор схемы соединения обмотки статора зависит от линейного напряжения сети и паспортных данных двигателя. В паспорте трёхфазного двигателя задаются линейные напряжения сети и схема соединения обмотки статора. Например, 380/660, Δ/Y . Данный двигатель можно включать в сеть с $U_{\text{л}} = 660 \text{ В}$ по схеме звезда или в сеть с $U_{\text{л}} = 380 \text{ В}$ – по схеме треугольник.

Основное назначение обмотки статора – создание в машине вращающегося магнитного поля.

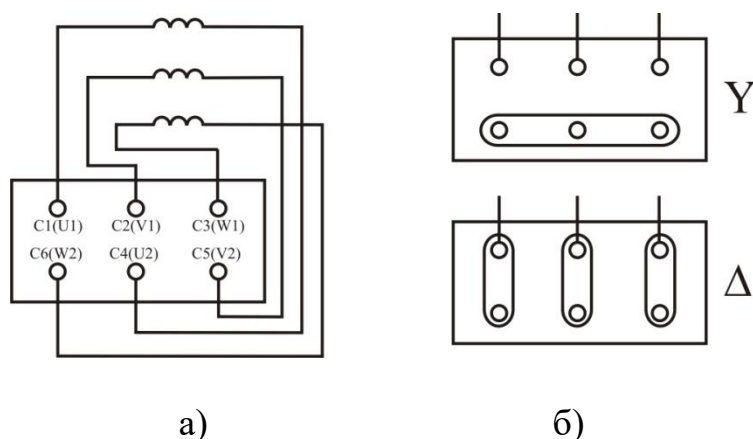


Рисунок 11.2 – Клемник асинхронной машины (а) и соединение обмоток статора по схеме Y и Δ (б)

Сердечник ротора набирается из листов электротехнической стали, на внешней стороне которых имеются пазы, в которые закладывается обмотка ротора. Обмотка ротора бывает двух видов: короткозамкнутая и фазная. Соответственно этому асинхронные двигатели бывают с короткозамкнутым ротором и фазным ротором (с контактными кольцами).

Короткозамкнутая обмотка (рис. 11.3, б) ротора состоит из стержней, которые закладываются в пазы сердечника ротора. С торцов эти стержни замыкаются торцевыми кольцами. Такую обмотку называют «беличья клетка». Двигатель с короткозамкнутым ротором не имеет подвижных контактов. За счёт этого такие двигатели обладают высокой надёжностью. Обмотка ротора выполняется из меди, алюминия, латуни и других материалов.

Доливо-Добровольский первым создал двигатель с короткозамкнутым ротором и исследовал его свойства. Он выяснил, что у таких двигателей есть очень серьёзный недостаток – ограниченный пусковой момент. Доливо-Добровольский назвал причину этого недостатка – сильно закороченный ротор. Им же была предложена конструкция двигателя с фазным ротором (рис. 11.4).

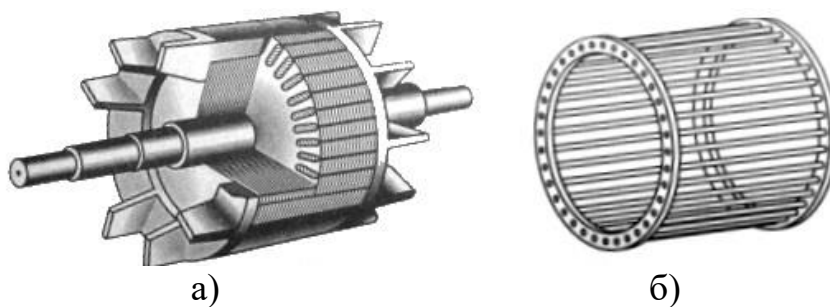


Рисунок 11.3 – Короткозамкнутый ротор (а), обмотка ротора (б)

У фазного ротора обмотка выполняется трёхфазной, аналогично обмотке статора, с тем же числом пар полюсов. Витки обмотки закладываются в пазы сердечника ротора и соединяются по схеме звезда. Концы каждой фазы соединяются с контактными кольцами, закреплёнными на валу ротора, и через щётки выводятся во внешнюю цепь. Контактные кольца изготавливают из латуни или стали, они должны быть изолированы друг от друга и от вала. В качестве щёток используют металлографитные щётки, которые прижимаются к контактным кольцам с помощью пружин щёткодержателей, закреплённых неподвижно в корпусе машины.

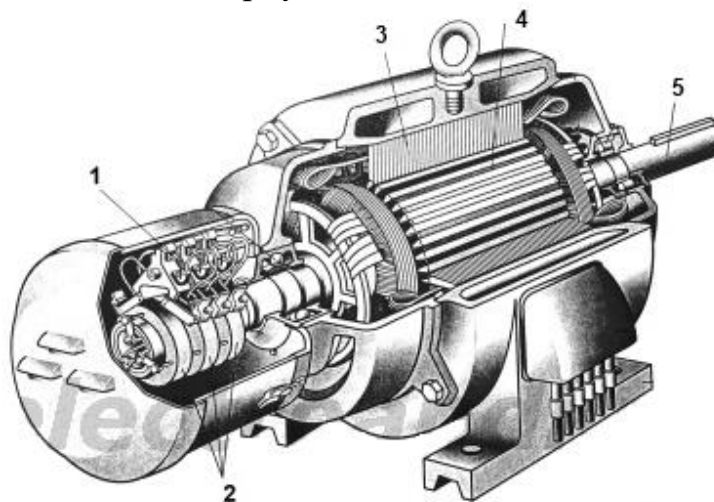


Рисунок 11.4 – Разрез асинхронного электродвигателя с фазным ротором: 1 – щетки, 2 – контактные кольца, 3 – сердечник с обмоткой статора, 4 – ротор, 5 – вал.

На рисунке 11.5 приведено условное графическое обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым и фазным ротором.

На щитке машины, закреплённом на станине, приводятся паспортные данные: номинальная полезная мощность (на валу); номинальные значения линейного напряжения и тока для указанной схемы соединения; номинальная частота вращения; коэффициент полезного действия; коэффициент мощности; масса; режим работы; тип машины.

При обозначении двигателей всех серий принята следующая структура:

X0 X1 X2 X3 X4 X5 X6 X7 X8 X9, где

X0 – номер серии (4А, 4АМ, АИР, 5А);

XI – исполнение по способу защиты от воздействия окружающей среды

(Н – защищенное; отсутствие буквы – закрытое обдуваемое);

X2 – модификация основного исполнения двигателя (отсутствие буквы – двигатель с короткозамкнутым ротором; К – с фазным ротором; С – с повышенным скольжением; Р – с повышенным пусковым моментом);

X3 – исполнение по материалу станины и подшипниковых щитов (А – станина и подшипниковые щиты из алюминия; Х – станина алюминиевая, а щиты чугунные или наоборот; отсутствие буквы – станина и щиты чугунные или стальные);

X4 – двух- или трехзначная цифра, обозначающая высоту оси вращения, мм;

X5 – установочный размер по длине станины статора (S – меньший, М – средний, L – большой);

X6 – длина сердечника статора (А – меньшая, В – большая; отсутствие буквы – в данном установочном размере станины и сердечники только одной длины);

X7 – число полюсов, если двигатель многоскоростной, то указывают через знак дроби несколько цифр (2/4/6);

X8 – климатическое исполнение;

X9 – категория размещения.

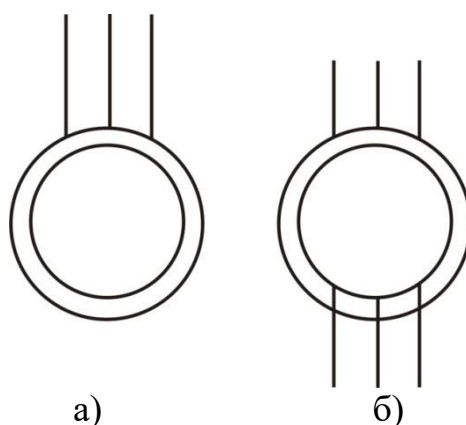


Рисунок 11.5 – Условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым (а) и фазным (б) ротором

Для получения вращающегося магнитного поля необходимо выполнение следующих условий:

- наличие не менее двух обмоток;
- токи в обмотках должны отличаться по фазе;
- оси обмоток должны быть смещены в пространстве.

В трёхфазной машине при одной паре полюсов ($p = 1$) оси обмоток должны быть смещены в пространстве на угол 120° электрических, при двух парах полюсов ($p = 2$) оси обмоток должны быть смещены в пространстве на угол 60° и т.д.

Рассмотрим магнитное поле, которое создаётся с помощью трёхфазной обмотки, имеющей одну пару полюсов ($p = 1$) (рис. 11.6). Оси обмоток фаз смещены в пространстве на угол 120° и создаваемые ими магнитные

индукции отдельных фаз (B_A, B_B, B_C) смещены в пространстве тоже на угол 120° .

Магнитные индукции полей, создаваемые каждой фазой, как и напряжения, подведённые к этим фазам, являются синусоидальными и отличаются по фазе на угол 120° .

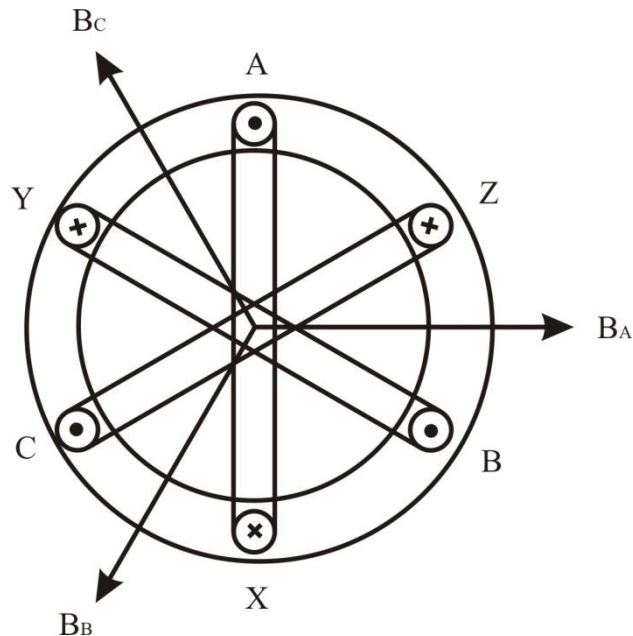


Рисунок 11.6 – Размещение трехфазной обмотки статора

МДС каждой катушки создает магнитное поле с индукцией B , тогда можно записать:

$$\begin{aligned} \hat{A}_{\hat{A}} &= \hat{A}_m \cdot \sin \omega t; \\ \hat{A}_{\hat{B}} &= \hat{A}_m \cdot \sin (\omega t - 120); \\ \hat{A}_{\hat{C}} &= \hat{A}_m \cdot \sin (\omega t - 240). \end{aligned} \quad (11.1)$$

Магнитная индукция результирующего магнитного поля определяется векторной суммой этих трёх магнитных индукций $\dot{B} = \dot{B}_A + \dot{B}_B + \dot{B}_C$ и равна $\dot{B} = \frac{3}{2} \dot{B}_m$.

Магнитная индукция B результирующего магнитного поля машины вращается, оставаясь неизменной по величине. Таким образом, трёхфазная обмотка статора создаёт в машине круговое вращающееся магнитное поле. Направление вращения магнитного поля зависит от порядка чередования фаз.

Частота вращения магнитного поля n_1 зависит от частоты сети f и числа пар полюсов магнитного поля p_1 :

$$n_1 = \frac{60 \cdot f}{p_1}. \quad (11.2)$$

Частота вращения магнитного поля не зависит от режима работы асинхронной машины и её нагрузки.

Асинхронная машина может работать в режимах двигателя и генератора.

Режим двигателя служит для преобразования потребляемой из сети электрической энергии в механическую.

Обмотка статора создаёт магнитное поле, вращающееся с частотой n_1 в определенном направлении. Это поле будет наводить согласно закону электромагнитной индукции в обмотке ротора ЭДС. Направление ЭДС определяется по правилу правой руки. В обмотке ротора появится ток, направление которого примем совпадающим с направлением ЭДС. В результате взаимодействия обмотки ротора с током и вращающегося магнитного поля возникает электромагнитная сила F . Направление силы определяется по правилу левой руки. В данном режиме электромагнитная сила создаст вращающий момент, под действием которого ротор начнёт вращаться с частотой n_2 . Направление вращения ротора совпадает с направлением вращения магнитного поля. Чтобы изменить направление вращения ротора (реверсировать двигатель), нужно изменить направление вращения магнитного поля. Для реверса двигателя нужно изменить порядок чередования фаз подведённого напряжения, т.е. переключить две фазы.

Частота вращения ротора n_2 всегда меньше n_1 , отсюда появилось название двигателя – асинхронный (несинхронный). Для сравнения частоты вращения магнитного поля и частоты вращения ротора ввели коэффициент, который назвали скольжением и обозначили буквой s . Скольжение может измеряться в относительных единицах и в процентах:

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (11.3)$$

При работе асинхронных двигателей в номинальном режиме скольжение равно $2 \div 8 \%$

Режим генератора служит для преобразования механической энергии в электрическую, т.е. асинхронная машина должна развивать на валу тормозной момент и отдавать в сеть электрическую энергию. Асинхронная машина переходит в режим генератора, если ротор начинает вращаться быстрее магнитного поля ($n_2 > n_1$). Этот режим может наступить, например, при регулировании частоты вращения ротора.

Пусть $n_2 > n_1$. При этом изменится (по сравнению с режимом двигателя) направление ЭДС и тока ротора, а также изменится направление электромагнитной силы и электромагнитного момента. Машина начинает развивать на валу тормозной момент (потребляет механическую энергию) и возвращает в сеть электрическую энергию (изменилось направление тока ротора, т.е. направление передачи электрической энергии).

СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Краткие теоретические сведения.

3. Краткие ответы на контрольные вопросы.
4. Краткие выводы по работе.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Основные конструктивные элементы асинхронного двигателя и их назначение.
2. Назначение и принцип действия асинхронного двигателя.
3. Как маркируют клеммы фаз обмотки статора асинхронного двигателя?
4. Как соединяются клеммы фаз обмотки статора асинхронного двигателя при схеме звезда и треугольник?
5. Поясните, как осуществить реверс ротора асинхронного двигателя?
6. Что такое холостой ход асинхронного двигателя?
7. Величина скольжения в первое мгновение пуска асинхронного двигателя.
8. Какой диапазон скольжения характеризует двигательный режим работы асинхронной машины?
9. Какой диапазон скольжения характеризует генераторный режим работы асинхронной машины?

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ОБОЗНАЧЕНИЯ БУКВЕННО-ЦИФРОВЫЕ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ (ГОСТ 2.710-81)

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Двухбуквенный код	Примеры видов элементов
А	Устройства		Усилители, приборы телеуправления, лазеры, мазеры
В	Преобразователи неэлектрических величин в электрические (кроме генераторов и источников питания) или наоборот	ВА	Громкоговоритель
		ВЕ	Сельсин-приемник
		ВС	Сельсин-датчик
		ВК	Тепловой датчик
		ВL	Фотоэлемент
		ВР	Датчик давления
		ВR	Датчик частоты вращения (тахогенератор)
С	Конденсаторы		
D	Схемы интегральные, микросборки	DA	Схема интегральная аналоговая
		DD	Схема интегральная, цифровая, логический элемент
Е	Элементы разные	ЕК	Нагревательный элемент
		EL	Лампа осветительная
F	Разрядники, предохранители, устройства защитные	FA	Дискретный элемент защиты по току мгновенного действия
		FU	Предохранитель плавкий
		FV	Дискретный элемент защиты по напряжению, разрядник
G	Генераторы, источники питания, кварцевые осцилляторы	GB	Батареи, аккумуляторы, электрохимические и электротермические источники
H	Устройства индикационные и сигнальные	HA	Прибор звуковой сигнализации
		HL	Прибор световой сигнализации
K	Реле, контакторы, пускатели	KA	Реле токовое
		KK	Реле электротепловое
		KM	Контактор, магнитный пускатель
		KT	Реле времени
		KV	Реле напряжения
L	Катушки индуктивности, дроссели	LL	Дроссель люминесцентного освещения
M	Двигатели		Двигатели постоянного и переменного тока
P	Приборы, измерительное оборудование	PA	Амперметр
		PI	Счетчик активной энергии
		PK	Счетчик реактивной энергии
		PR	Омметр
		PV	Вольтметр
		PW	Ваттметр

Q	Выключатели и разъединители в силовых цепях	QF	Выключатель автоматический
		QK	Короткозамыкатель
		QS	Разъединитель
R	Резисторы	RK	Терморезистор
S	Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных	SA	Выключатель или переключатель
		SB	Выключатель кнопочный
T	Трансформаторы, автотрансформаторы	TA	Трансформатор тока
		TV	Трансформатор напряжения
U	Преобразователи электрических величин в электрические, устройства связи	UZ	Преобразователь частотный, инвертор, генератор частоты, выпрямитель
V	Приборы электровакуумные, полупроводниковые	VD	Диод, стабилитрон
		VL	Прибор электровакуумный
		VT	Транзистор
		VS	Тиристор
X	Соединения контактные	XP	Штырь
		XS	Гнездо
		XT	Соединение разборное
Y	Устройства механические с электромагнитным приводом	YA	Электромагнит
		YB	Тормоз с электромагнитным приводом
		YC	Муфта с электромагнитным приводом

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ НЕКОТОРЫХ ЭЛЕМЕНТОВ И УСТРОЙСТВ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Наименование	Обозначение	Наименование	Обозначение
ГОСТ 2.755-87 Обозначения условные графические в электрических схемах устройства коммутационные и контактные			
Контакт замыкающий		Контакт контактора замыкающий	
Контакт замыкающий выключателя трехполюсного с автоматическим срабатыванием максимального тока		Выключатель-разъединитель трехполюсный	
Контакт замыкающий с замедлением, действующим при срабатывании			
срабатывании		или	
		при возврате	

Наименование	Обозначение
ГОСТ 2.722-68 Обозначения условные графические в схемах. Машины электрические	
Обмотка статора (каждой фазы) машины переменного тока, обмотка последовательного возбуждения машины постоянного тока	
Обмотка параллельно возбуждения машины постоянного тока, обмотка независимого возбуждения	
Статор, обмотка статора. Общее обозначение	
Статор с трехфазной обмоткой: а) соединенной в треугольник	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Форма I</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Форма II</p> </div> </div>
б) соединенной в звезду	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div style="text-align: center;"> <p>Форма I</p> </div> <div style="text-align: center;"> <p>Форма II</p> </div> </div>
Ротор. Общее обозначение	
Ротор с обмоткой, коллектором и щетками	

Наименование	Обозначение
ГОСТ 2.721-74 Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения	
Постоянный ток, основное обозначение.	—
Полярность постоянного тока:	
а) положительная	+
б) отрицательная	-
m проводная линия постоянного тока напряжением U , например:	m — U
а) двухпроводная линия постоянного тока напряжением 110 В	2 — 110 В
б) трехпроводная линия постоянного тока, включая средний провод, напряжением 110 В между каждым внешним проводником и средним проводом 220 В - между внешними проводниками	2М — 110/220 В
Переменный ток, основное обозначение.	~
Переменный ток с числом фаз m , частотой f , например, переменный трехфазный ток частотой 50 Гц	m ~ f
	3 ~ 50 Гц
Переменный ток с числом фаз m , частотой f , напряжением U , например:	m ~ fU
а) переменный ток, трехфазный, частотой 50 Гц,	3 ~ 50 Гц 220 В

Наименование	Обозначение
ГОСТ 2.721-74 Обозначения условные графические в схемах. Обозначения общего применения	
напряжением 220 В	
б) переменный ток, трехфазный, четырехпроводная линия (три провода, нейтраль) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	$3N \sim 50 \text{ Гц } 220/380 \text{ В}$
в) переменный ток, трехфазный, пятипроводная линия (три провода фаз, нейтраль, один провод защитный с заземлением) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	$3 NPE \sim 50 \text{ Гц } 220/380 \text{ В}$
г) переменный ток, трехфазный, четырехпроводная линия (три провода фаз, один защитный провод с заземлением, выполняющий функцию нейтрали) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	$3 PEN \sim 50 \text{ Гц } 220/380 \text{ В}$

Наименование	Обозначение
ГОСТ 2.728-74 Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы	
Резистор	
Конденсатор постоянной емкости	

ПРИЛОЖЕНИЕ 3

ОСНОВНЫЕ ЕДИНИЦЫ СИ

Величина	Единица		
	наименование	обозначение	
		русское	международное
Длина	метр	м	m
Масса	килограмм	кг	kg
Время	секунда	с	s
Сила электрического тока	ампер	А	A
Термодинамическая температура	кельвин	К	K
Количество вещества	моль	моль	mol
Сила света	кандела	кд	cd

ПРИЛОЖЕНИЕ 4

НЕКОТОРЫЕ ЕДИНИЦЫ МЕХАНИЧЕСКИХ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ И МАГНИТНЫХ ВЕЛИЧИН

Величина	Обозначение величины	Единица		Выражение производной единицы	
		наименование	обозначение	через другие единицы СИ	через основные единицы СИ
Частота	f	герц	Гц	-	с^{-1}
Сила	G	ньютон	Н	-	$\text{м} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Давление	p	паскаль	Па	$\text{Н}/\text{м}^2$	$\text{м}^{-1} \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Энергия, работа, количество теплоты	Q	джоуль	Дж	Н/м	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$

Мощность: активная, реактивная, полная	P, Q, S	ватт, вольт-ампер реактивный, вольт-ампер	Вт, вар, В·А	Дж/с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3}$
Количество электричества, электрический заряд	q	кулон	Кл	А·с	$\text{с} \cdot \text{А}$
Электрическое напряжение, электрический потенциал, электродвижущая сила (ЭДС)	U, φ, E	вольт	В	Вт/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-1}$
Электрическая емкость	C	фарада	Ф	Кл/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^4 \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическое сопротивление: активное, реактивное, полное	r, x, z	ом	Ом	В/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Электрическая проводимость	Y	сименс	См	А/В	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кг}^{-1} \cdot \text{с}^3 \cdot \text{А}^2$
Поток магнитной индукции	Φ	вебер	Вб	В·с	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Магнитная индукция	B	тесла	Тл	Вб/м ²	$\text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-1}$
Индуктивность	L	генри	Гн	Вб/А	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2} \cdot \text{А}^{-2}$
Световой поток	Φ	люмен	лм	-	кд·ср
Освещенность	E	люкс	лк	-	$\text{м}^{-2} \cdot \text{кд} \cdot \text{ср}$
Момент силы, вращающий или тормозящий момент	M	ньютон-метр	Н·м	-	$\text{м}^2 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-2}$
Момент инерции, динамический момент	J	килограмм-метр в квадрате	кг·м ²	-	кг·м ²
Скорость поступательного движения	v	метр в секунду	м/с	-	м/с
Угловая скорость	ω	радиан в секунду	рад/с	-	рад/с
Частота вращения	n	оборот в минуту	об/мин	-	-
Удельное электрическое сопротивление	ρ	ом-метр	Ом·м	-	$\text{м}^3 \cdot \text{кг} \cdot \text{с}^{-3} \cdot \text{А}^{-2}$
Напряженность магнитного поля	H	ампер на метр	А/м	-	А/м
Магнитодвижущая сила (МДС)	F	ампер	А	-	А

ПРИЛОЖЕНИЕ 5
ПРИСТАВКИ ДЛЯ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕСЯТИЧНЫХ КРАТНЫХ И ДОЛЬНЫХ ЕДИНИЦ
И ИХ НАИМЕНОВАНИЕ

Приставка	Отношение к главной единице	Обозначение приставки		Приставка	Отношение к главной единице	Обозначение приставки	
		русское	международное			русское	международное
Атто	10^{-18}	а	a	Деци	10^{-1}	д	d
Фемто	10^{-15}	ф	f	Дека	10^1	да	da
Пико	10^{-12}	п	p	Гекто	10^2	г	h
Нано	10^{-9}	н	n	Кило	10^3	к	k
Микро	10^{-6}	мк	μ	Мега	10^6	М	M
Милли	10^{-3}	м	m	Гига	10^9	Г	G
Санتي	10^{-2}	с	c	Тера	10^{12}	Т	T

ЛИТЕРАТУРА

1. Прохоров, С. Г. Электрические машины / С. Г. Прохоров, Р. А. Хуснутдинов. – Ростов н/Дону: Феникс, 2012. – 409 с.: ил.
2. Кацман М. М. Лабораторные работы по электрическим машинам и электрическому приводу: учеб. Пособие / М. М. Кацман. – 7-е изд. – М.: Издательский центр «Академия», 2011. – 256 с.
3. Копылов И. П. Электрические машины. / И.П. Копылов.- М.: Логос, 2000.-607 с.
4. Ванурин В. Н. Электрические машины. / В.Н. Ванурин.- М.: Колос, 1995.- 192 с.
5. Вольдек А.И. Электрические машины. / А. И. Вольдек.: Л., Энергия, 1978. – 832 с.
6. Александров Н. Н. Электрические машины / Н. Н. Александров. - М.: Энергоатомиздат, 1986. - 384 с.
7. Токарев Б.Ф. Электрические машины. / Б.Ф. Токарев - М.: Энергоатомиздат, 1990. - 624с.
8. Епифанов А.П. Электрические машины [Электронный учебник] / А. П. Епифанов, 2006. - 272 с. - Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=591