

Г.Г.РЕКУС, В.Н.ЧЕСНОКОВ

**ЛАБОРАТОРНЫЕ
РАБОТЫ**
**по электротехнике
и основам
электроники**



Г.Г.РЕКУС, В.Н.ЧЕСНОКОВ

ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ по электротехнике и основам электроники

Допущено
Государственным комитетом СССР
по народному образованию
в качестве учебного пособия
для студентов неэлектротехнических
специальностей вузов



Москва
«Высшая школа» 1989

ББК 31.2
Р36
УДК 621.3

Рецензенты: кафедра электротехники, электроники и электроавтоматики Московского института химического машиностроения (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Г. А. Кардашев); кафедра общей электротехники Московского института стали и сплавов (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А. Е. Краснопольский)

Рекус Г. Г., Чесноков В. Н.

Р36 Лабораторные работы по электротехнике и основам электроники: Учеб. пособие для неэлектротехн. спец. вузов. — М.: Высш. шк., 1989. — 240 с.: ил.
ISBN 5—06—000110—5

В книге приведены описания лабораторных работ, основные теоретические положения, общие методические рекомендации, представлены основные электроизмерительные приборы, правила техники безопасности.

Р $\frac{2202020000(4309000000) - 195}{001(01) - 89}$ 171—89

ББК 31.2
6П2.1

Учебное издание

**Рекус Григорий Гаврилович
Чесноков Владлен Николаевич**

**ЛАБОРАТОРНЫЕ РАБОТЫ
по электротехнике и основам электроники**

Зав. редакцией В. И. Трефилов. Редактор Е. А. Орехова. Младший редактор В. В. Пашенкова. Художественный редактор Т. М. Скворцова. Технические редакторы Ю. А. Хорева и Г. А. Виноградова. Корректор В. В. Кожуткина

ИБ № 8060

Изд. № ЭР—474. Сдано в набор 07.07.88. Подп. в печать 10.02.89. Формат 84×108¹/₃₂. Бум. кн.-журн. Гарнитура литературная. Печать высокая. Объем 12,60 усл. печ. л. 12,81 усл. кр.-отт. 12,48 уч.-изд. л. Тираж 30 000 экз. Зак. № 1489. Цена 45 коп.

Издательство «Высшая школа», 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14.

Ярославский полиграфкомбинат Союзполиграфпрома при Государственном комитете СССР по делам издательств, полиграфии и книжной торговли. 150014, Ярославль, ул. Свободы, 97.

ISBN 5—06—000110—5 © Издательство «Высшая школа», 1989

ПРЕДИСЛОВИЕ

Основными направлениями экономического и социального развития СССР на 1986—1990 годы и на период до 2000 года поставлены задачи дальнейшего развития народного хозяйства на базе новой техники и ускорения научно-технического прогресса. Выполнение этих задач неразрывно связано с широкой автоматизацией и совершенствованием технологических процессов, что невозможно без внедрения в производство средств автоматизации, созданных на основе электротехники, электроники, вычислительной и микропроцессорной техники.

В современных условиях инженер любого профиля не может активно содействовать совершенствованию технологических процессов без достаточно глубоких знаний основ электротехники и промышленной электроники. В связи с этим учебными планами технических высших учебных заведений СССР предусмотрен курс электротехники и основ электроники, при изучении которого немаловажное значение имеет лабораторный практикум, так как выполнение лабораторных работ способствует более глубокому усвоению основных теоретических положений изучаемых электротехнических и электронных устройств.

В процессе выполнения лабораторных работ создаются определенные условия для получения студентами необходимых навыков в пользовании разнообразными измерительными приборами и электрооборудованием, что также имеет большое значение. Наряду с этим в ходе выполнения лабораторных работ у студентов накапливается определенный опыт экспериментирования и развивается критический подход к результатам проведенного эксперимента.

В соответствии с программой курса электротехники и основ электроники для студентов инженерно-технических (неэлектротехнических) специальностей высших учебных заведений предусмотрено выполнение лабораторных работ по следующим разделам: электрические цепи постоянного тока, одно- и трехфазные электрические

цепи, переходные процессы, основы электроники, катушка индуктивности с магнитопроводом, магнитный усилитель, однофазный трансформатор, асинхронный электродвигатель, электродвигатель постоянного тока, синхронный электродвигатель и сельсины.

Данный лабораторный практикум составлен применительно к универсальным учебным лабораторным стендам типа ЭВ-4*, однако он может быть использован и при наличии нестандартного лабораторного оборудования.

Авторы выражают глубокую благодарность рецензентам: коллективу кафедры электротехники, электроники и электроавтоматики Московского института химического машиностроения (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. Г. А. Кардашев) и коллективу кафедры общей электротехники Московского института стали и сплавов (зав. кафедрой д-р техн. наук, проф. А. Е. Краснопольский), сделавшим ряд важных замечаний по тексту рукописи.

Пожелания и замечания по книге просим направлять по адресу: 101430, Москва, ГСП-4, Неглинная ул., д. 29/14, издательство «Высшая школа».

Авторы

* При модернизации лабораторных стендов ЭВ-4 предусматривается расширение перечня лабораторных работ по разделу основы электроники.

§ 1. ПРАВИЛА ВНУТРЕННЕГО РАСПОРЯДКА И ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

При работе в лаборатории электротехники и электроники во избежание несчастных случаев, а также преждевременного выхода из строя приборов и электрооборудования студент при выполнении лабораторных работ должен строго выполнять следующие правила внутреннего распорядка и техники безопасности:

1. Приступая в лаборатории к работе, студент должен ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.

2. Студенты обязаны не только строго выполнять эти правила, но и требовать неуклонного выполнения их от своих товарищей.

3. После ознакомления с правилами внутреннего распорядка и инструктажа по технике безопасности студент должен расписаться в соответствующем журнале.

4. При работе в лаборатории категорически запрещается приносить с собой вещи и предметы, загромождающие рабочие места, способствующие созданию условий, могущих привести к нарушению правил техники безопасности.

5. В лаборатории запрещается громко разговаривать, покидать рабочие места и переходить от одного стенда к другому.

6. Приступая к работе в лаборатории, студенческая группа делится на бригады, которые затем распределяются по лабораторным стендам.

7. Лабораторная работа, пропущенная студентом, выполняется по разрешению деканата и особому расписанию.

8. Сборку электрической цепи производят соединительными проводами при выключенном напряжении питания в строгом соответствии со схемой, представленной в лабораторном практикуме, обеспечивая при этом надеж-

ность электрических контактов всех разъёмных соединений.

9. Приступая к сборке электрической цепи, необходимо убедиться в том, что к стенду не подано напряжение.

10. При сборке электрической цепи необходимо следить за тем, чтобы соединительные провода не перегибались и не скручивались петлями. Приборы и электрооборудование расставляются так, чтобы было удобно ими пользоваться.

11. Собранная электрическая цепь предъявляется для проверки преподавателю или дежурному лаборанту.

12. Включение электрической цепи под напряжение (после проверки) производится только с разрешения и в присутствии преподавателя или лаборанта.

13. При обнаружении неисправностей в электрической цепи необходимо немедленно отключить ее от питающей сети и доложить об этом преподавателю или лаборанту.

14. Переключения и исправления в собранной электрической цепи разрешается производить только при отключенном напряжении питания.

15. Запрещается прикасаться пальцами, карандашами и другими предметами оголенных токоведущих частей электрической цепи, находящихся под напряжением.

16. При работе с конденсаторами следует помнить, что на их зажимах, отключенных от сети, некоторое время сохраняется электрический заряд, могущий быть причиной поражения электрическим током.

17. При обнаружении повреждений электрического оборудования и приборов стенда, а также при появлении дыма, специфического запаха или искрения необходимо немедленно выключить напряжение питания стенда и известить об этом преподавателя или лаборанта.

18. После выполнения лабораторной работы необходимо выключить напряжение питания стенда, разобрать исследуемую электрическую цепь и привести в порядок рабочее место.

19. В случае поражения человека электрическим током необходимо немедленно обесточить стенд, выключив напряжение питания.

При потере сознания и дыхания необходимо немедленно освободить пострадавшего от стесняющей его одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.

§ 2. ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ И УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Подготовка к лабораторным работам. Лабораторные работы в группах проводятся в соответствии с расписанием учебных занятий в институте и в течение определенного времени. Поэтому для выполнения лабораторных работ студент должен руководствоваться следующими положениями:

1) предварительно ознакомиться с графиком выполнения лабораторных работ;

2) внимательно ознакомиться с описанием соответствующей лабораторной работы и установить, в чем состоит основная цель и задача этой работы;

3) по лекционному курсу и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной лабораторной работе;

4) до проведения лабораторной работы подготовить в рабочей тетради соответствующие схемы, миллиметровку для построения графиков, таблицы наблюдений и расчетные формулы;

5) неподготовленные к работе студенты к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Выполнение лабораторных работ. Успешное выполнение лабораторных работ может быть достигнуто в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и ожидаемые результаты, поэтому важным условием обстоятельности проводимых исследований является тщательная подготовка к лабораторной работе. При этом необходимо соблюдение следующих требований.

1. Перед сборкой электрической цепи студенты должны предварительно ознакомиться с электрическим оборудованием и его номинальными данными*, а также с измерительными приборами, предназначенными для проведения соответствующей лабораторной работы.

2. Сборку электрической цепи необходимо производить в точном соответствии с заданием. Целесообразно вначале соединить все элементы цепи, включаемые последовательно, а затем — параллельно. Электрические цепи,

* Номинальными данными являются значения тока, напряжения и мощности, на которые рассчитаны соответствующие электротехнические устройства.

включаемые параллельно, рекомендуется соединять проводами другого цвета.

3. После окончания сборки электрическая цепь должна быть предъявлена для проверки. Включать цепь под напряжением можно только с разрешения преподавателя или дежурного лаборанта.

4. Запись показаний всех приборов в процессе выполнения лабораторной работы следует производить по возможности одновременно и быстро.

5. Результаты измерений заносятся студентом в свою рабочую тетрадь.

6. После выполнения отдельного этапа лабораторной работы результаты опыта вместе с простейшими контрольными расчетами предъявляются для проверки преподавателю до разборки электрической цепи.

7. Разбирать электрическую цепь, а также переходить к сборке новой можно только по разрешению преподавателя.

8. После окончания работы в лаборатории рабочее место должно быть приведено в порядок.

9. В течение всего времени занятий в лаборатории студенты обязаны находиться на своих рабочих местах. Выходить из помещения лаборатории во время занятий можно только с разрешения преподавателя.

Оформление отчета по лабораторным работам. Составление отчета о проведенных исследованиях является важнейшим этапом выполнения лабораторной работы. По каждой выполненной работе в рабочей тетради составляют отчет, руководствуясь следующими положениями:

1) указать название и порядковый номер лабораторной работы, а также кратко сформулировать цель работы;

2) указать тип и номинальные данные испытуемых электрических машин и аппаратов, а также типы, номера, пределы измерений, класс точности и системы измерительных приборов, используемых при выполнении лабораторной работы (например: амперметр типа М42100, № 01985, магнитоэлектрической системы, 30 делен., предел измерений 3 А, кл. 1,5);

3) схемы и графики вычертить с помощью трафарета радиоинженера или циркуля и линейки с соблюдением принятых стандартных условных обозначений;

4) графические зависимости дать в прямоугольной системе координат в масштабе, с равномерными шкала-

ми; произвольный перенос начала координат не допускается; на графиках необходимо наносить экспериментальные точки;

5) отчет по каждой лабораторной работе должен содержать основные выводы.

§ 3. КРАТКОЕ ОПИСАНИЕ УНИВЕРСАЛЬНОГО ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА ТИПА ЭВ-4

Универсальный лабораторный стенд по электротехнике и основам электроники состоит из двух модулей: секции электрических цепей и основ электроники (секция 1) и секции электрических машин (секция 2) (рис. 1).

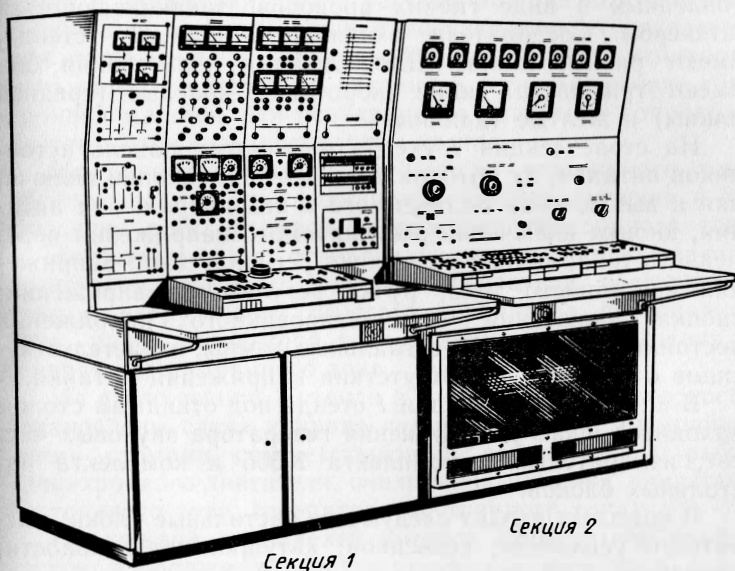


Рис. 1

На секции 1 стенда выполняются лабораторные работы по электрическим цепям (лабораторные работы 1—6), основам электроники (лабораторные работы 7—9) и электрическим аппаратам (лабораторные работы 10—12, 17). На секции 2 выполняются лабораторные работы по электрическим машинам (лабораторные работы 13—16).

Обе секции имеют одинаковые габариты и компоновку посадочных мест. В соответствии с различным функцио-

нальным назначением секций каждая из них имеет соответствующие комплекты оборудования и компоновки лицевых панелей и пультов управления.

Лицевая часть секции 1 (см. рис. 1) состоит из восьми панелей. На каждой из них указаны соответствующие номера.

Все элементы электрических цепей, установленных на панелях (резисторы, конденсаторы, диоды и пр.), имеют стандартное графическое обозначение на лицевой части панелей и электрически подсоединены к соответствующим гнездам.

Набор элементов электрических цепей лабораторных работ и подключение их к соответствующим источникам питания осуществляется с помощью соединителей, изготовленных в виде гибких проводов, заканчивающихся штекером. Соединители, входящие в комплект стенда, имеют разные длины. Для удобства пользования они имеют три цвета: синие (короткие), красные (средней длины) и желтые (длинные).

На столе секции 1 стенда размещена панель источников питания, на которой расположены: кнопки включения и выключения подводимого к ней напряжения питания; кнопка включения регулируемого напряжения переменного тока; кнопка включения регулируемого напряжения постоянного тока; ручка регулятора напряжения; кнопка включения стабилизированного напряжения постоянного тока 12В; сигнальные лампы, свидетельствующие о наличии или отсутствии напряжения питания.

В нижней части секции 1 стенда под откидным столом находится шкаф для хранения генератора звуковых частот, измерительного комплекта К505 и комплекта настольных блоков.

В комплект входят следующие настольные блоки: магнитного усилителя; сельсинов; катушки индуктивности; однофазного трансформатора.

Подключение секции 1 к питающей сети осуществляется автоматическим выключателем, установленным на лицевой ее части, под столом.

Лицевая часть секции 2 стенда (см. рис. 1) состоит из нескольких панелей, расположенных над столом. Панель измерительных приборов установлена в верхней части секции и занимает всю ее ширину. На панели размещены измерительные приборы, функциональное назначение которых определено соответствующими надписями над ними.

Ниже панели измерительных приборов установлены слева направо следующие три панели с элементами управления и сигнализации: общая панель; панель электрических машин переменного тока; панель электрических машин постоянного тока.

На общей панели размещены: сигнальные лампы подачи напряжения питания к секции 2 стенда (сеть); кнопки регулирования уровня питающего напряжения с обозначениями «↑» и «↓»; кнопки включения приборов для измерения частоты вращения и момента нагрузки электромашинных агрегатов 1 и 2 и ручка регулятора возбуждения электромагнитных тормозов.

На панели электрических машин переменного тока размещены кнопки дистанционного включения и отключения возбуждения, ручка регулятора тока возбуждения синхронной машины; кнопки дистанционного подключения и отключения синхронной машины либо асинхронного электродвигателя к питающей сети. Включение синхронной машины или асинхронного двигателя сопровождается загоранием сигнальной лампы.

На панели электрических машин постоянного тока расположены: кнопка дистанционного подключения и отключения регулируемого напряжения постоянного тока и соответствующая сигнальная лампа; переключатели резисторов пускового реостата двигателя постоянного тока и нагрузочного реостата генератора постоянного тока; ручка регулятора тока возбуждения двигателя и генератора постоянного тока.

На столе секции 2 стенда в горизонтальной плоскости установлены слева направо четыре панели с мнемоническими схемами соответствующих лабораторных работ (асинхронного двигателя, синхронной машины, двигателя постоянного тока, генератора постоянного тока).

На каждой из панелей имеется стандартное графическое изображение соответствующих элементов электрических цепей (статор, якорь, измерительные приборы и т. д.). Все элементы имеют гнезда, в которые вставляются штекеры соединителей, обеспечивающих сборку электрической цепи соответствующей лабораторной работы согласно заданию.

Под откидным столом на лицевой части секции 2 стенда установлен автоматический выключатель, обеспечивающий подачу напряжения питания к секции и защиту ее от аварийных режимов.

В нижней части секции 2 стенда за прозрачным ши-

том установлены два электромашинных агрегата. Электромашинный агрегат 1 состоит из асинхронного трехфазного электродвигателя и генератора постоянного тока, валы которых соединены с помощью асинхронной муфты скольжения, работающей в режиме электромагнитного тормоза. Электромашинный агрегат 2 состоит из электродвигателя постоянного тока и синхронной машины, валы которых соединены с помощью другой аналогичной муфты. Оба агрегата оснащены бесконтактными датчиками момента нагрузки и частоты вращения. Пространство внутри секции, где установлены агрегаты, подсвечивается люминесцентными лампами, загорающимися при подаче напряжения питающей сети.

Лабораторная работа 1

Измерение токов и напряжений приборами непосредственного отсчета в цепи постоянного тока. Измерение сопротивлений методом амперметра и вольтметра

Цель работы. Ознакомиться с измерительными приборами непосредственного отсчета (амперметрами и вольтметрами), методикой измерения токов, напряжений и сопротивлений в электрических цепях.

Основные теоретические положения

Контроль за режимом работы электрооборудования осуществляется с помощью электроизмерительных приборов.

Измерение тока, потребляемого электрическими цепями, производится амперметрами — электроизмерительными приборами, включенными последовательно в цепь, в которой измеряется ток. Обмотку амперметра выполняют из небольшого числа витков толстого провода, поэтому она характеризуется очень малым сопротивлением, что необходимо для того, чтобы при включении амперметра в электрическую цепь, в которой производится измерение тока, сопротивление этой цепи практически не изменялось. При этом мощность, потребляемая прибором, оказывается ничтожной.

Включенные таким образом амперметры используются

как приборы непосредственной оценки, они показывают непосредственно числовое значение измеряемого тока.

В цепях постоянного тока в основном используются амперметры магнитоэлектрической, реже — электромагнитной систем. Обмотка амперметра может допускать ограниченное значение измеренного тока. Для обеспечения возможности расширения предела измерения амперметра в электрических цепях постоянного тока используют шунты — специальные тарированные резисторы, включаемые параллельно с амперметром (рис. 1.1).

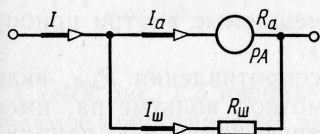


Рис. 1.1

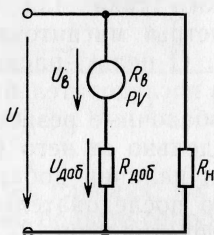


Рис. 1.2

Сопротивление шунта $R_{\text{ш}}$, как следует из схемы рис. 1.1, включено параллельно сопротивлению R_a обмотки амперметра, поэтому ток I электрической цепи распределяется по соответствующим параллельным ее ветвям обратно пропорционально сопротивлениям:

$$I_a/I_{\text{ш}} = R_{\text{ш}}/R_a,$$

где $I_{\text{ш}}$ — ток в цепи шунта; I_a — ток в цепи амперметра (показание амперметра).

Для схемы рис. 1.1 справедливо следующее соотношение между токами: $I = I_a + I_{\text{ш}}$.

С учетом этого измеряемый ток I в электрической цепи можно определить по показаниям амперметра и известным значениям сопротивлений обмотки амперметра и шунта:

$$I = I_a(1 + R_a/R_{\text{ш}}) = K_{\text{ш}}I_a,$$

где $K_{\text{ш}}$ — шунтирующий множитель.

В ряде случаев шкала амперметра градуируется с учетом наличия шунта, при этом измеряемый ток в электрической цепи отсчитывается непосредственно по шкале прибора.

Измерение напряжения, действующего в электрической цепи постоянного тока, осуществляется с помощью

соответствующих электроизмерительных приборов — вольтметров. Для снижения мощности, потребляемой вольтметрами, обмотки последних выполняют из большого числа витков тонкого провода с достаточно большим сопротивлением.

Вольтметры подключаются параллельно к участку электрической цепи, напряжение на которой необходимо измерить. При этом они используются как приборы непосредственной оценки и указывают непосредственно числовое значение измеряемого напряжения. В цепях постоянного тока для этой цепи обычно используются вольтметры магнитоэлектрической и электромагнитной систем. С целью расширения предела измерения вольтметров последовательно с обмоткой включают тарированные добавочные резисторы, помещаемые внутри прибора или отдельно от него (рис. 1.2).

При наличии добавочного сопротивления $R_{доб}$, включенного последовательно с обмоткой вольтметра, имеющей сопротивление R_v , подлежащее измерению напряжение U распределяется пропорционально этим сопротивлениям

$$U_v/U_{доб} = R_v/R_{доб},$$

где U_v — напряжение на зажимах вольтметра (показания вольтметра); $U_{доб}$ — напряжение, приложенное к добавочному сопротивлению.

Измеряемое напряжение $U = U_v + U_{доб}$. С учетом этого измеряемое напряжение определяют по показаниям вольтметра U_v и известным сопротивлениям обмотки вольтметра и добавочного сопротивления:

$$U = (1 + R_{доб}/R_v) U_v = K_{доб} U_v,$$

где $K_{доб}$ — добавочный множитель.

Во многих случаях шкала вольтметра градуируется с учетом включенного последовательно с его обмоткой добавочного сопротивления, при этом измеряемое напряжение, действующее на зажимах электрической цепи, отсчитывается непосредственно по шкале прибора.

Существует несколько методов измерения электрических сопротивлений. При этом широко используется метод амперметра и вольтметра, основанный на применении закона Ома к участку электрической цепи, который содержит измеряемое сопротивление. По падению напряжения на участке цепи и току представляется возможным определить его сопротивление.

Измерение больших электрических сопротивлений методом амперметра и вольтметра осуществляется по схеме рис. 1.3. При этом измеряемое сопротивление

$$R_x = U/I,$$

где U — напряжение, подводимое к измеряемому сопротивлению; I — ток в цепи измеряемого сопротивления.

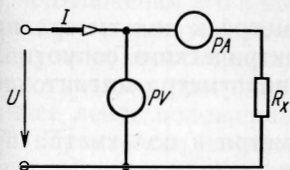


Рис. 1.3

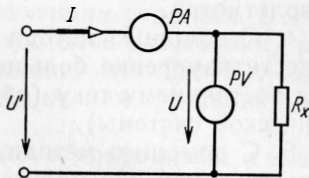


Рис. 1.4

Схема рис. 1.3 используется в тех случаях, когда измеряемое сопротивление значительно больше сопротивления обмотки амперметра, последовательно с которой оно включено. При этом пренебрегают падением напряжения на сопротивлении обмотки амперметра, считая, что подводимое напряжение полностью приложено к измеряемому сопротивлению. При точном определении измеряемого сопротивления с учетом ошибки, вносимой амперметром, его значение рассчитывается по формуле

$$R_x = (U - R_a I)/I,$$

где R_a — сопротивление обмотки амперметра.

При измерении малых сопротивлений, когда сопротивление обмотки амперметра соизмеримо с измеряемым сопротивлением, для определения его значения следует использовать схему рис. 1.4, которая позволяет исключить влияние сопротивления обмотки амперметра на точность определения измеряемого сопротивления.

Однако эта схема не учитывает влияния сопротивления обмотки вольтметра R_v на ток в цепи амперметра. Для точного определения сопротивления с учетом погрешности, вносимой вольтметром, его значение рассчитывается так: $R_x = U/(I - U/R_v)$.

Задание по работе

1. Измерить с помощью измерительных приборов непосредственного отсчета (амперметров и вольтметра)

токи и напряжения на участках смешанной электрической цепи постоянного тока.

2. По экспериментальным данным п. 1 рассчитать сопротивления всех ветвей исследуемой электрической цепи в соответствии с заданными условиями.

3. Составить принципиальные схемы для измерения больших и малых сопротивлений по методу амперметра и вольтметра.

4. С помощью метода амперметра и вольтметра произвести измерение большого электрического сопротивления постоянному току (обмотки вольтметра магнитоэлектрической системы).

5. С помощью метода амперметра и вольтметра произвести измерение малого электрического сопротивления постоянному току (обмотки амперметра магнитоэлектрической системы).

6. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Произвести внешний осмотр измерительных приборов — амперметров и вольтметра, установленных на

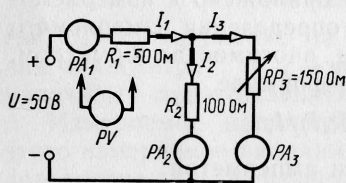


Рис. 1.5

панели 6 лабораторного стенда, и записать в отчет по лабораторной работе технические данные (тип, систему, род тока, предел измерения, класс точности, цену деления шкалы) приборов.

2. Собрать электрическую цепь (принципиальная схема представлена на рис. 1.5) по монтажной схеме, приведенной на рис. 1.6. Соединение резисторов и измерительных приборов при сборке электрической цепи производить с помощью соединительных проводов, входящих в комплект стенда.

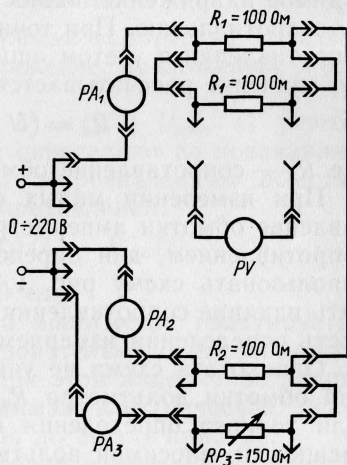


Рис. 1.6

Ручку движка переменного резистора RP_3 установить в крайнее левое положение. В качестве амперметров PA_1 , PA_2 и PA_3 использовать имеющиеся на рабочей панели стенда амперметры с номинальными значениями измеряемого тока соответственно 2А, 1А и 2А. Измерение напряжений на отдельных участках цепи производится с помощью вольтметра с пределом измерения 150 В путем подключения его к соответствующим участкам. Далее подключить данную электрическую цепь к источнику регулируемого постоянного напряжения (0—220 В). При этом рукоятку регулятора напряжения установить в крайнее левое положение.

3. Произвести измерение токов и напряжений в электрической цепи: а) включить регулируемый источник питания постоянного напряжения путем нажатия последовательно кнопок «сеть» и «постоянное напряжение» и, поворачивая плавно рукоятку регулятора, увеличивать напряжение на выходе источника питания от нулевого его значения до 50 В, контролируя его по вольтметру, установленному на панели источников питания, и одновременно контролируя значение постоянного тока на входе цепи по показаниям амперметра PA_1 . Записать показания всех амперметров в табл. 1.1;

б) измерение напряжений на участках электрической цепи производить, переключая вольтметр с одного ее участка на другой; затем, поддерживая напряжение на входе цепи равным 50 В, уменьшить сопротивление переменного резистора RP_3 до нуля.

Записать показания всех приборов в табл. 1.1.

Таблица 1.1

Номера измерений	Измерения						Вычисления			
	U, В	I ₁ , А	I ₂ , А	I ₃ , А	U ₁ , В	U ₂ , В	R ₁ , Ом	R ₂ , Ом	R ₃ , Ом	R _Σ , Ом
1										
2										
....										

4. Произвести измерение сопротивления резистора RP_3 методом амперметра и вольтметра: а) подключить вольтметр к параллельному участку электрической цепи и, установив движок переменного резистора RP_3 в промежуточное положение, записать показания амперметра

PA_3 и вольтметра PV при трех значениях напряжения на входе цепи: $U = 50; 60$ и 70 В. При этом, исходя из номинальных значений резисторов, ток в цепи амперметра PA_1 не должен превышать значения 1, 4 А, а в цепях амперметров PA_2 и PA_3 — значений 0,7 А;

б) по измеренным значениям токов и напряжений определить сопротивление переменного резистора RP_3 при данном положении движка;

в) отключить напряжение источника питания, предварительно снизив его до нулевого значения.

5. Произвести измерение сопротивления вольтметра:

а) начертить общую принципиальную схему для измерения больших сопротивлений по методу амперметра и вольтметра;

б) заменить в монтажной схеме рис. 1.6 переменный резистор RP_3 — вольтметром PV , амперметр PA_3 — цифровым вольтамперметром В7-22А, предварительно подготовив его для измерения постоянного тока на пределе 0—2 А; второй цифровой вольтамперметр В7—22А подготовить для измерения постоянного напряжения на пределе 0—200 В и включить его вместо резистора R_2 и амперметра PA_2 ;

в) включить регулируемый источник питания и установить на входе электрической цепи (по вольтметру источника) напряжение, при котором ток цифрового амперметра PA_3 не превышает 0,2 А;

г) по трем показаниям цифровых амперметра и вольтметра рассчитать сопротивление исследуемого прибора — вольтметра PV .

6. Произвести измерение сопротивления амперметра:

а) начертить общую принципиальную схему для из-

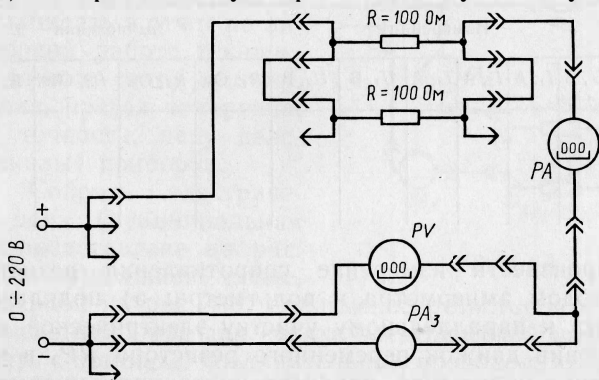


Рис. 1.7

мерения малых сопротивлений по методу амперметра и вольтметра;

б) собрать электрическую цепь в соответствии с монтажной схемой, приведенной на рис. 1.7; измерение тока в цепи амперметра PA_3 , сопротивление обмотки которого определяется, производить цифровым вольтамперметром, подготовленным для измерения постоянного тока на пределе 0—2000 мА, а измерение напряжения на амперметре PA_3 — вольтамперметром, подготовленным для измерения постоянного напряжения на пределе 0—0,2 В;

в) включить напряжение питания электрической цепи и произвести измерения при трех значениях напряжения питания, соответствующих токам в цепи амперметра PA_3 0,6; 0,8 и 1 А. По результатам измерений определить сопротивление амперметра PA_3 .

Контрольные вопросы

1. Назовите системы электроизмерительных приборов, используемых в электрических цепях постоянного тока.

2. Укажите стандартные классы точности электроизмерительных приборов.

3. Объясните принцип действия амперметра магнитоэлектрической системы.

4. Объясните принцип действия вольтметра электромагнитной системы.

5. Поясните способ расширения предела измерения амперметра в цепях постоянного тока.

6. Поясните способ расширения предела измерения вольтметра в цепях постоянного тока.

7. Нарисуйте схему для измерения методом амперметра и вольтметра малых электрических сопротивлений.

8. Нарисуйте схему для измерения методом амперметра и вольтметра больших электрических сопротивлений.

9. Напишите формулу для точного определения малых электрических сопротивлений методом амперметра и вольтметра с учетом сопротивления обмотки амперметра.

10. Напишите формулу для точного определения больших электрических сопротивлений методом амперметра и вольтметра с учетом сопротивления обмотки вольтметра.

Лабораторная работа 2

Исследование разветвленной электрической цепи постоянного тока с линейными и нелинейными элементами

Цель работы. Применение закона Ома и законов Кирхгофа для расчета разветвленных электрических цепей постоянного тока, снятие вольт-амперных характе-

ристик для линейных и нелинейных элементов цепи, использование графического метода расчета линейных и нелинейных электрических цепей постоянного тока.

Основные теоретические положения

Совокупность устройств для получения, передачи, распределения и потребления электрической энергии называется электрической цепью. Простейшая электрическая цепь постоянного тока (рис. 2.1) состоит

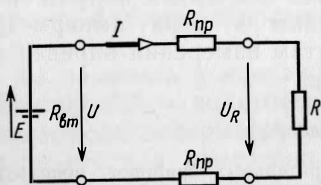


Рис. 2.1

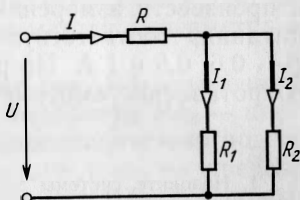


Рис. 2.2

из источника электрической энергии с внутренним сопротивлением $R_{вт}$, электродвижущей силой ЭДС E или напряжением U на зажимах, потребителя электрической энергии R , преобразующего электрическую энергию в тепловую, и проводов с сопротивлением $R_{пр}$, обеспечивающих электрическое соединение источника с потребителем.

В электрических цепях взаимосвязь между ЭДС, напряжениями, токами и сопротивлениями определяется законом Ома и законами Кирхгофа, с помощью которых можно произвести расчет цепи.

Для рассматриваемой замкнутой электрической цепи в соответствии с законом Ома ток прямо пропорционален ЭДС источника и обратно пропорционален суммарному сопротивлению всей цепи: $I = E / (R + R_{вт} + 2R_{пр})$.

Вместе с тем в соответствии с законом Ома для пассивного участка электрической цепи (т.е. для участка цепи, который не содержит ЭДС) ток пропорционален напряжению U_R , действующему на данном участке, и обратно пропорционален его сопротивлению: $I = U_R / R$.

Исходя из полученного выражения, напряжение, действующее на участке электрической цепи, можно рассматривать как падение напряжения на этом участке от тока: $U_R = RI$.

При смешанном соединении потребителей электрической энергии, когда одна часть потребителей соединена параллельно, а другая — последовательно (рис. 2.2), определить токи можно по законам Кирхгофа.

В соответствии с первым законом Кирхгофа алгебраическая сумма токов в точке разветвления электрической цепи равна нулю ($\sum \pm I = 0$). С учетом этого выражение для токов в точке разветвления для рассматриваемой схемы $I = I_1 + I_2$.

Для определения токов во всех ветвях электрической цепи составляют еще два уравнения по второму закону Кирхгофа, в соответствии с которым алгебраическая сумма напряжений и падений напряжения в замкнутом контуре электрической цепи равна нулю ($\sum \pm U + \sum \pm RI = 0$). Применительно к рассматриваемой цепи справедливы уравнения, составленные по второму закону Кирхгофа:

$$RI + R_1 I_1 - U = 0;$$

$$RI + R_2 I_2 - U = 0.$$

В результате совместного решения полученной системы уравнений определяют токи во всех ветвях и падения напряжения на участках электрической цепи: $U_R = RI$ и $U_1 = U_2 = R_1 I_1 = R_2 I_2$.

Приведенные уравнения справедливы для линейных и для нелинейных цепей постоянного тока.

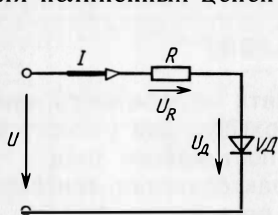


Рис. 2.3

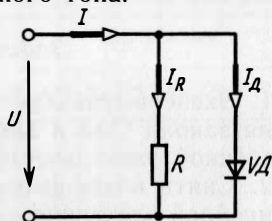


Рис. 2.4

В отличие от линейных электрических цепей, параметры которых не зависят от тока и напряжения, при расчете нелинейных цепей, параметры которых зависят от тока и напряжения, удобно пользоваться графическим методом с использованием экспериментальных вольт-амперных характеристик элементов цепи, т. е. зависимостей тока в цепи от напряжения на элементах цепи.

На рис. 2.3 представлена схема последовательного, а на рис. 2.4 — параллельного соединений линейного эле-

мента — резистора R и нелинейного элемента — полупроводникового диода VD , вольт-амперные характеристики которых приведены на рис. 2.5 и 2.6.

При последовательном соединении элементов цепи определение зависимости тока на входе от значения приложенного напряжения производится, как показано на рис. 2.5, суммированием напряжений $U' = U'_R + U'_D$ при заданном значении тока I' .

При параллельном соединении элементов цепи указанную зависимость находят суммированием соответствующих токов $I' = I'_D + I'_R$ при заданном значении напряжения U' (рис. 2.6).

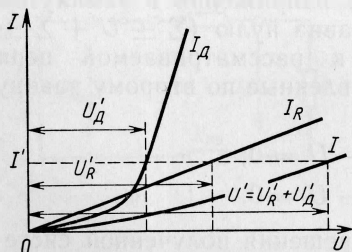


Рис. 2.5

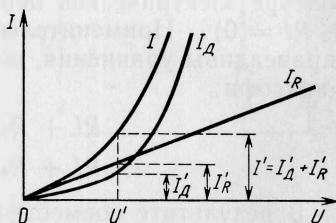


Рис. 2.6

Аналогично находят остальные координаты результирующих вольт-амперных характеристик цепи путем изменения значений I' и U' .

Задание по работе

1. Экспериментально установить возможность применения закона Ома и законов Кирхгофа для расчета разветвленной электрической цепи постоянного тока.
2. Снять вольт-амперные характеристики линейной и нелинейной электрических цепей постоянного тока.
3. Используя полученные вольт-амперные характеристики, произвести графическим методом расчет последовательной и параллельной нелинейных электрических цепей постоянного тока.
4. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием соответствующей панели стенда.
2. Рассчитать для электрической цепи, схема которой

приведена на рис. 1.5, токи и напряжения на отдельных ее участках (I_1, I_2, I_3, U_1, U_2) при значениях сопротивлений резисторов $R_1 = 50$ Ом, $R_2 = 100$ Ом, $R_3 = 150$ Ом и напряжении на входе цепи, равном 130 В.

3. По данным проведенного расчета выбрать из имеющихся на панели приборов три амперметра и вольтметр для измерения токов и напряжений на всех участках электрической цепи.

4. Провести исследование линейной электрической цепи:

а) собрать электрическую цепь по монтажной схеме, приведенной на рис. 1.6;

б) произвести измерение напряжений на всех участках цепи переключением вольтметра с одного участка на другой;

в) ручку движка переменного резистора RP_3 установить в крайнее левое положение. Подключить собранную электрическую цепь к регулируемому источнику питания постоянным напряжением (0—220 В);

г) включить регулируемый источник питания постоянным напряжением, плавно увеличивая напряжение на выходе источника от нуля, произвести измерение токов и напряжений на участках цепи при напряжениях на входе, равных $U = 50; 70; 90; 100$ и 130 В; результаты измерений занести в табл. 2.1;

Т а б л и ц а 2.1

Номера измерений	Измерения						Вычисления			
	$U, В$	$U_1, В$	$U_{23}, В$	$I_1, А$	$I_2, А$	$I_3, А$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$R, Ом$
1										
2										
...										

д) сравнивая результаты произведенных измерений и вычислений, убедиться в соблюдении закона Ома и законов Кирхгофа для рассматриваемой цепи независимо от ее режима работы;

е) используя измеренные токи и напряжения, построить в одной координатной системе вольт-амперные характеристики $I_1(U_1); I_2(U_2); I_3(U_2)$ для всех резисторов электрической цепи и, пользуясь ими, построить вольт-амперные характеристики $I_2(U_2) + I_3(U_2)$ и $I_1(U)$; по ха-

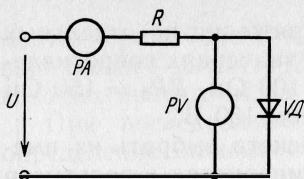


Рис. 2.7

характеристике $I_1(U)$ определить суммарное сопротивление всей цепи R и сравнить его со значением, полученным из табл. 2.1.

5. Провести исследование нелинейных электрических цепей:

а) собрать электрическую цепь для снятия прямой ветви вольт-амперной характеристики полупроводникового диода VD , принципиальная схема которой представлена на рис. 2.7, а монтажная — на рис. 2.8; измерение тока в цепи производить магнитоэлектрическим амперметром с пределом измерения 2 А, а измерение прямого напряжения на диоде — вольтамперметром В7-22А на пределе 2 В;

б) включить источник питания и, изменяя напряжение на входе цепи от нуля до значения, при котором ток в цепи диода равен 2 А, записать показания вольтметра в табл. 2.2 при токах: $I = 0; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0; 1,2; 1,4$ А и т. д., выключить напряжение источника питания;

в) по измеренным значениям тока и напряжения построить прямую ветвь вольт-амперной характеристики для полупроводникового диода;

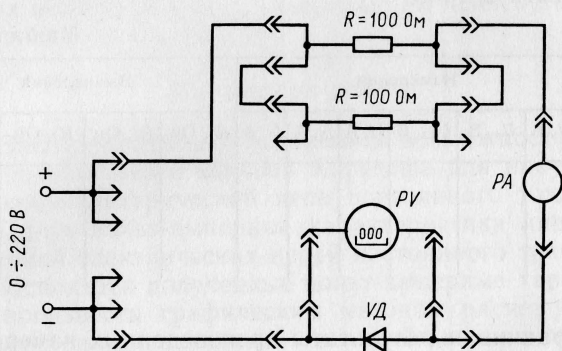


Рис. 2.8

г) заменить в монтажной схеме рис. 2.8 диод VD на лампу накаливания VL , амперметр PA — на амперметр с пределом измерения 1А, а цифровой вольтамперметр переключить по схеме для измерения больших и средних сопротивлений, изменив его предел измерения на 200 В;

д) включить источник питания и, увеличивая напря-

Таблица 2.2

Номера измерений	Полупроводниковый диод		Лампа накаливания	
	I, A	U, B	I, A	U, B
1				
2				
...				

жение на входе электрической цепи от нуля до 150 В (через каждые 30 В), занести показания вольтметра и амперметра в табл. 2.2;

е) снять вольт-амперные характеристики нелинейных электрических цепей при последовательном соединении резистора ($R = 100 \text{ Ом}$) и лампы накаливания (с номинальными значениями напряжения и мощности $U_{\text{ном}} = 127 \text{ В}$, $P_{\text{ном}} = 40 \text{ Вт}$) и при параллельном их соединении. Монтажная схема последовательной цепи приведена на рис. 2.9, а параллельной — на рис. 2.10.

В монтажных схемах после-

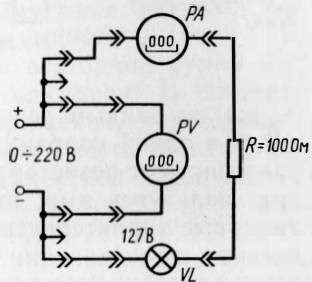


Рис. 2.9

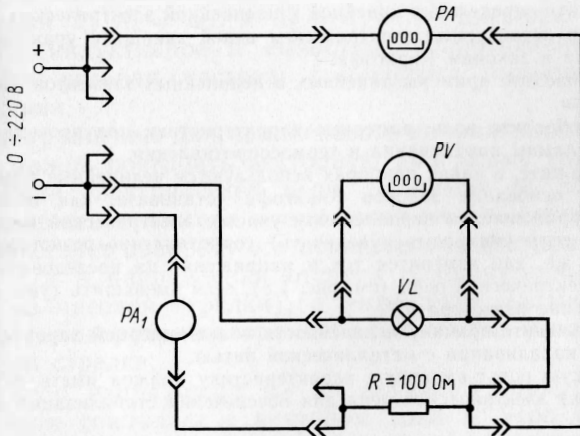


Рис. 2.10

довательной и параллельной нелинейных цепей для измерения токов и напряжений используются вольтамперметры типа В7-22А; амперметр с пределом измерения тока 2000 мА, а вольтметр с пределом измерения напряжения 200 В.

При работе с параллельным включением ток в цепи резистора R не должен превышать значения, равного 0,7 А.

Результаты измерений занести в табл. 2.3;

Т а б л и ц а 2.3

Последовательная цепь	I , А						
	U , В						
Параллельная цепь	I , А						
	U , В						

ж) по данным результатов измерений п. 4 и 5 построить в одной координатной системе вольт-амперные характеристики резистора $R = 100$ Ом и лампы накаливания; пользуясь ими, нанести на график входные вольт-амперные характеристики при последовательном и параллельном их соединении. На расчетные характеристики нанести экспериментально полученные данные из табл. 2.3.

Контрольные вопросы

1. Дайте определения линейной и нелинейной электрических цепей.
2. Для исследуемых электрических цепей запишите уравнения по закону Ома и законам Кирхгофа.
3. Приведите примеры линейных и нелинейных элементов электрической цепи.
4. Изобразите вольт-амперные характеристики полупроводникового диода, лампы накаливания и термосопротивления.
5. Укажите, в каких приборах используются нелинейные элементы.
6. На основании законов Кирхгофа установите, как изменятся токи и напряжение на параллельном участке электрической цепи (см. рис. 1.5), если уменьшить (увеличить) сопротивление резистора RP_3 .
7. То же, как изменятся ток и напряжение на последовательном участке электрической цепи (см. рис. 1.5), если уменьшить (увеличить) сопротивление резистора RP_3 .
8. Объясните причину нелинейности вольт-амперной характеристики лампы накаливания с металлической нитью.
9. Какую вольт-амперную характеристику должен иметь нелинейный элемент электрической цепи для обеспечения стабилизации напряжения?
10. Какую вольт-амперную характеристику должен иметь нелинейный элемент электрической цепи для обеспечения стабилизации тока?

Лабораторная работа 3

Неразветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями. Резонанс напряжений

Ц е л ь р а б о т ы. Исследование неразветвленной электрической цепи синусоидального тока при наличии потребителей с активно-реактивными сопротивлениями, определение параметров цепи, установление условий резонанса напряжений.

Основные теоретические положения

В неразветвленной электрической цепи переменного тока, содержащей элементы с параметрами: активное сопротивление R , индуктивность L и емкость C (рис. 3.1), напряжение питающей сети равно векторной сумме напряжений, действующих на участках цепи. В соответствии с этим выражение для напряжения, подводимого к электрической цепи (рис. 3.1), может быть записано по второму закону Кирхгофа в комплексной (векторной) форме

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C,$$

где $\dot{U}_R = R\dot{I}$, $\dot{U}_L = jX_L\dot{I}$, $\dot{U}_C = -jX_C\dot{I}$ — комплексные напряжения на участках цепи, определяемые как произведения комплексного тока \dot{I} на соответствующие сопротивления R ; $X_L = \omega L$ и $X_C = 1/\omega C$ — активное и реактивные индуктивное и емкостное сопротивления; $\omega = 2\pi f$ — угловая частота; f — частота питающего напряжения.

По уравнению для комплексного напряжения на входе цепи можно построить векторную диаграмму тока и напряжений электрической цепи, принимая во внимание, что умножение вектора напряжения на множитель $(+j)$ соответствует повороту его относительно вектора тока на угол $\pi/2$ в направлении отсчета положительных углов (против часовой стрелки), а умножение на множитель $(-j)$ — повороту вектора напряжения на угол $\pi/2$ по часовой стрелке.

Вектор напряжения \dot{U}_R на активном сопротивлении при этом совпадает с вектором тока \dot{I} . Угол φ — угол между векторами тока и напряжения, подводимого к цепи (откладывается от вектора тока к вектору напряже-

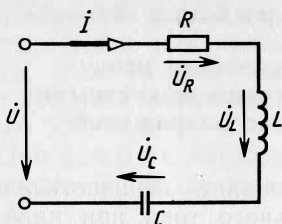


Рис. 3.1

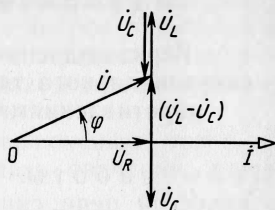


Рис. 3.2

ния). Построенная таким образом векторная диаграмма для электрической цепи (рис. 3.1) представлена на рис. 3.2.

Полученное ранее уравнение для подводимого к электрической цепи комплексного напряжения с учетом его составляющих преобразуется к виду

$$\dot{U} = R\dot{I} + jX_L\dot{I} - jX_C\dot{I} = [R + j(X_L - X_C)]\dot{I} = \underline{Z}\dot{I}$$

или к виду уравнения, записанного в комплексной форме по закону Ома для всей цепи:

$$\dot{I} = \dot{U}/\underline{Z},$$

где $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ — комплексное сопротивление электрической цепи переменного тока.

Модуль комплексного сопротивления (полное сопротивление) цепи переменного тока

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Из этого выражения следует, что полное сопротивление электрической цепи переменного тока зависит не только от параметров соответствующей цепи, но и от частоты питающего напряжения; причем для линейной цепи значение как полного сопротивления, так и его составляющих не зависит от значения подводимого напряжения.

При этом взаимосвязь между действующими значениями тока и напряжения и полным сопротивлением цепи определяется соотношениями $U = ZI$ или $I = U/Z$.

Из треугольника напряжений, представленного на векторной диаграмме рис. 3.2, можно получить треугольник сопротивлений (рис. 3.3) для рассматриваемой цепи, разделив стороны этого треугольника на комплексный ток \dot{I} , из которого следует, что

$$\cos\varphi = R/Z, \quad \sin\varphi = X/Z = (X_L - X_C)/Z.$$

Полученные выражения показывают, что угол сдвига

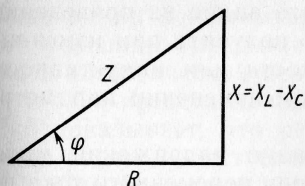


Рис. 3.3

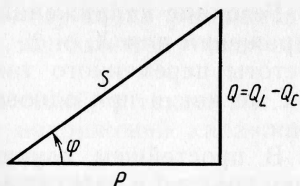


Рис. 3.4

фаз φ между током \dot{I} и напряжением \dot{U} питающей сети зависит от характера сопротивлений, включенных в цепь переменного тока.

Умножив стороны треугольника сопротивлений на квадрат тока в цепи I^2 , получим треугольник мощностей (рис. 3.4). Активная мощность цепи переменного тока

$$P = UI \cos \varphi = S \cos \varphi.$$

Из треугольника мощностей можно установить взаимосвязь между активной P , полной S и реактивной Q мощностями электрической цепи:

$$P = S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi, \quad S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

При этом реактивная составляющая полной мощности цепи находится как разность реактивной индуктивной Q_L и реактивной емкостной Q_C ее составляющих: $Q = Q_L - Q_C$.

Выражения для полной мощности цепи переменного тока в комплексной форме записывают в следующем виде:

$$\underline{S} = \dot{U} \dot{I}^* = P + jQ = P + j(Q_L - Q_C)$$

$$\text{и } \underline{S} = S(\cos \varphi + j \sin \varphi),$$

где $\dot{I}^* = I e^{-j\varphi_i}$ — сопряженное значение комплексного тока $\dot{I} = I e^{+j\varphi_i}$.

В неразветвленной электрической цепи переменного тока при определенных условиях может наступить резонанс напряжений (явление в неразветвленной электрической цепи, содержащей последовательно соединенные индуктивный и емкостный элементы, при котором разность фаз напряжения и тока на входе цепи равна нулю) — особое состояние цепи переменного тока при последовательном включении элементов с индуктивностью L и емкостью C , при котором индуктивное сопротивление цепи оказывается равным емкостному ее сопротивлению ($X_L = X_C$).

Резонанс напряжений, как это видно из приведенных выражений для X_L и X_C , можно получить при изменении частоты переменного тока, емкости или индуктивности, так же как и при одновременном изменении параметров цепи.

В простейшем случае резонанс напряжений может быть получен в электрической цепи переменного тока при последовательном включении катушки индуктивности и конденсаторов. При этом, изменяя емкость конденсаторов при постоянных параметрах катушки, получают резонанс напряжений при неизменных значениях напряжения и индуктивности, частоты и активного сопротивления цепи. При изменении емкости C конденсаторов происходит изменение реактивного емкостного сопротивления. При этом полное сопротивление цепи также изменяется, следовательно, изменяются ток, коэффициент мощности, напряжения на катушке индуктивности, конденсаторах и активном сопротивлении катушки и активная, реактивная и полная мощности электрической цепи. Зависимости тока I , коэффициента мощности $\cos \varphi$ и полного сопро-

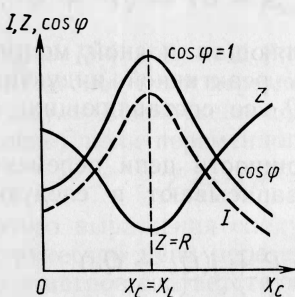


Рис. 3.5

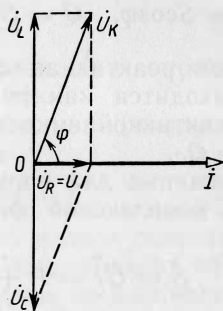


Рис. 3.6

тивления Z цепи переменного тока в функции емкостного сопротивления (резонансные кривые) для рассматриваемой цепи приведены на рис. 3.5.

Векторная диаграмма тока и напряжений этой цепи при резонансе представлена на рис. 3.6. Как видно из этой диаграммы, реактивная составляющая напряжения U_L на катушке при резонансе равна напряжению U_C на конденсаторе. При этом напряжение на катушке индуктивности U_K при резонансе вследствие того, что катушка кроме реактивного сопротивления X_L обладает еще и активным сопротивлением R_K , оказывается больше на-

пряжения на конденсаторе. Поэтому точка резонанса в этих условиях определяется по наибольшему значению тока в электрической цепи.

Анализ представленных выражений, а также рис. 3.5 и 3.6 показывает, что резонанс напряжений характеризуется рядом существенных факторов.

1. При резонансе напряжений полное сопротивление электрической цепи переменного тока принимает минимальное значение и оказывается равным ее активному сопротивлению, т. е. $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R$.

2. Из этого следует, что при неизменном напряжении питающей сети ($U = \text{const}$) при резонансе напряжений ток в цепи достигает наибольшего значения $I = U/Z = U/R$. Теоретически ток может достигать больших значений, определяемых напряжением сети и активным сопротивлением катушки. При малом значении активного сопротивления ток может достигать большого значения.

3. Коэффициент мощности при резонансе $\cos \varphi = R/Z = R/R = 1$, т. е. принимает наибольшее значение, которому соответствует угол $\varphi = 0$. Это означает, что вектор тока \vec{I} и вектор напряжения сети \vec{U} при этом совпадают по направлению, так как они имеют равные начальные фазы $\psi_i = \psi_u$.

4. Активная мощность при резонансе $P = RI^2$ имеет наибольшее значение, равное полной мощности S , в то же время реактивная мощность цепи $Q = XI^2 = (X_L - X_C)I^2$ оказывается равной нулю: $Q = Q_L - Q_C = 0$.

При этом реактивная индуктивная и реактивная емкостная составляющие полной мощности $Q_L = Q_C = X_L I^2 = X_C I^2$ могут приобретать теоретически весьма большие значения, в зависимости от значений тока и реактивных сопротивлений.

5. При резонансе напряжений напряжения на емкости и индуктивности оказываются равными $U_C = U_L = X_C I = X_L I$ и в зависимости от тока и реактивных сопротивлений могут принимать большие значения, во много раз превышающие напряжение питающей сети. При этом напряжение на активном сопротивлении оказывается равным напряжению питающей сети, т. е. $U_R = U$.

Резонанс напряжений в промышленных электротехнических установках нежелательное и опасное явление, так как оно может привести к аварии вследствие недопустимого перегрева отдельных элементов электрической цепи или к пробое изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, изоляции кабелей и конденсаторов при

возможном перенапряжении на отдельных участках цепи.

В то же время резонанс напряжений в электрических цепях переменного тока широко используется в радиотехнике и электронике в различного рода приборах и устройствах, основанных на резонансном явлении.

Задание по работе

1. Произвести экспериментальное исследование неразветвленной электрической цепи переменного тока, состоящей из последовательно включенных катушки индуктивности, батареи конденсаторов и резисторов, а также электрических цепей, состоящих из различных сочетаний указанных элементов.

2. По экспериментальным данным произвести расчет параметров соответствующих электрических цепей.

3. Экспериментально определить параметры, при которых наступает резонанс напряжений для заданной электрической цепи, и построить резонансные кривые.

4. По полученным данным построить векторные диаграммы для различных режимов исследуемой электрической цепи.

5. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием панелей № 3 и № 4 лабораторного стенда и измерительным комплектом К505.

2. Записать в отчет по лабораторной работе технические данные измерительных приборов и оборудования, используемого при выполнении работы.

3. Собрать электрическую цепь, принципиальная схема которой представлена на рис. 3.7. В соответствии с

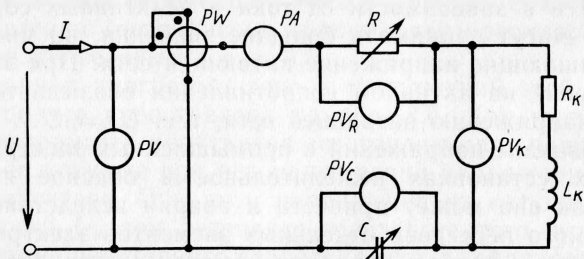


Рис. 3.7

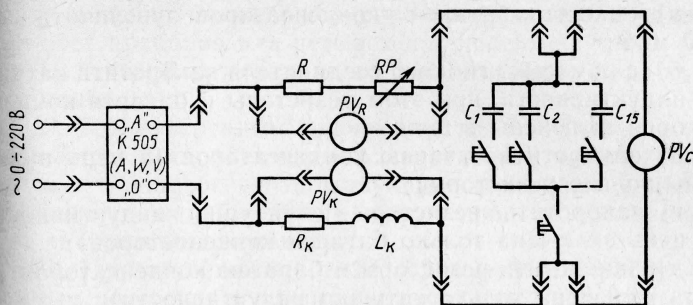


Рис. 3.8

монтажной схемой рис. 3.8 подключить параллельно каждому участку цепи вольтметры PV_R , PV_K , PV_C .

4. На панели № 4 соответствующими тумблерами установить емкость батареи конденсаторов, равной 80—100 мкФ, и наибольшее сопротивление переменного резистора.

5. Питание электрической цепи осуществлять от регулируемого источника питания синусоидальным напряжением, расположенного на панели источника питания. Включение источника питания производится нажатием кнопок «сеть» и «переменное». Перед включением необходимо убедиться, что ручка регулятора источника питания находится в крайнем левом положении ($U = 0$).

6. Измерение тока, мощности, напряжения на входе электрической цепи производить амперметром, ваттметром и вольтметром измерительного комплекта K505.

7. Установить заданное преподавателем значение напряжения на входе электрической цепи и записать показания всех измерительных приборов в табл. 3.1.

8. Выполнить аналогичные измерения при следующих изменениях в исследуемой электрической цепи:

Таблица 3.1

Номера измерений	Измерения						Вычисления									
	U , В	U_R , В	U_C , В	U_K , В	I , А	P , Вт	Z , Ом	R , Ом	X_C , Ом	C , мкФ	Z_L , Ом	R_K , Ом	X_K , Ом	L_K , мГн	$\cos\varphi_K$	$\cos\varphi$
1																
2																
...																

а) емкость батареи конденсаторов увеличить до 200 мкФ;

б) с помощью гибкого соединителя закоротить катушку индуктивности, при этом резисторы и батарея конденсаторов включены в цепь;

в) закоротить батарею конденсаторов (в цепь включены только резисторы);

г) закоротить резисторы и катушку индуктивности (в цепь включена только батарея конденсаторов);

д) закоротить резисторы и батарею конденсаторов (в цепь включена только катушка индуктивности).

Результаты всех измерений записать в табл. 3.1.

9. Снять резонансные кривые, т. е. зависимости тока, полного сопротивления и коэффициента мощности электрической цепи от емкости конденсаторов при последовательном включении катушки индуктивности и батареи конденсаторов:

а) исключить из схемы рис. 3.7 резисторы;

б) установить заданную преподавателем величину напряжения на входе электрической цепи и, изменяя емкость батареи конденсаторов, установить режим, при котором ток в цепи достигает наибольшей величины, а напряжения на катушке индуктивности и батарее конденсаторов окажутся примерно равными (напряжение на катушке индуктивности должно быть несколько большим напряжения на конденсаторах: $U_k \geq U_c$);

в) по показаниям ваттметра, амперметра и вольтметра на входе электрической цепи рассчитать коэффициент мощности ($\cos \varphi$). Изменяя емкость батареи конденсаторов, увеличивая или уменьшая ее на возможно малое значение, попытаться повысить коэффициент мощности цепи. При значении коэффициента мощности, близком к единице, можно считать, что в цепи имеет место резонансный режим. Записать показания всех приборов в табл. 3.2;

Т а б л и ц а 3.2

Номера измерений	Измерения					Вычисления							
	U , В	U_C , В	U_k , В	I , А	P , Вт	Z , Ом	X_C , Ом	C , мкФ	Z_k , Ом	X_k , Ом	L_k , мГн	$\cos \varphi_k$	$\cos \varphi$
1													
2													
...													

г) изменяя емкость конденсаторов, записать показания всех приборов для четырех наблюдений с таким расчетом, чтобы было сделано по два измерения до и после резонанса.

10. По измеренным значениям табл. 3.1 подсчитать параметры всех элементов электрической цепи и построить в масштабе соответствующие векторные диаграммы тока и напряжений и треугольник сопротивлений для катушки индуктивности.

11. По полученным в табл. 3.2 опытным и расчетным данным построить в масштабе векторные диаграммы для трех режимов цепи: при $U_k > U_c$, $U_k \approx U_c$ и $U_k < U_c$.

12. Построить в масштабе кривые изменения тока, коэффициента мощности, напряжения на катушке, напряжения на батарее конденсаторов и полного сопротивления электрической цепи в зависимости от емкости конденсаторов, т. е. I , $\cos\varphi$, U_k , U_c и Z в функции C .

Контрольные вопросы

1. В чем заключается явление резонанса напряжений и при каких условиях оно возникает?

2. Какую опасность представляет резонанс напряжений для электротехнических устройств?

3. Изменением каких параметров электрической цепи (см. рис. 3.1) можно получить резонанс напряжений?

4. С помощью каких приборов и по какому признаку можно судить о возникновении резонанса напряжений в электрической цепи?

5. Проведите анализ построенных векторных диаграмм до и после резонанса напряжений и дайте объяснение, в каком случае напряжение опережающее, а в каком — отстающее?

6. К чему приводит изменение активного сопротивления электрической цепи при резонансе напряжений?

7. Сохранится ли резонанс напряжений, если изменить только напряжение питающей сети? Можно ли получить резонанс напряжений путем изменения других параметров питающего напряжения?

8. Запишите выражения для тока, полного сопротивления и коэффициента мощности электрической цепи при резонансе напряжений.

9. Определите емкость конденсаторов при резонансе напряжений по показаниям вольтметра и амперметра.

10. В электрической цепи (см. рис. 3.7) заданы параметры всех элементов (R , R_k , L_k , C и ω), показания ваттметра и вольтметра на входе цепи. Запишите выражения для определения показаний амперметра и вольтметра на отдельных участках цепи.

Лабораторная работа 4

Разветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями. Резонанс токов

Цель работы. Исследование режимов работы электрической цепи при параллельном соединении потребителей электроэнергии с активно-реактивными сопротивлениями, определение параметров цепи, установление условий возникновения резонанса токов.

Основные теоретические положения

В электрических цепях переменного тока имеются цепи с параллельным соединением потребителей электроэнергии, при котором все потребители находятся под одним и тем же напряжением. При этом на ток в цепи каждого из потребителей не влияет их число. Значение тока в каждом из них определяется только значениями соответствующих сопротивлений и значением подводимого напряжения. Сопротивления в цепях переменного тока обычно носят комплексный характер. При этом каждое из них в общем случае можно представить в виде последовательно соединенных между собой сопротивлений R , X_L и X_C .

Примером электрической цепи переменного тока с параллельным соединением сопротивлений может служить цепь, представленная на рис. 4.1. Рассматривая отдель-

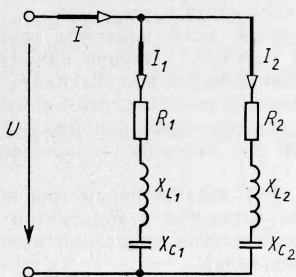


Рис. 4.1

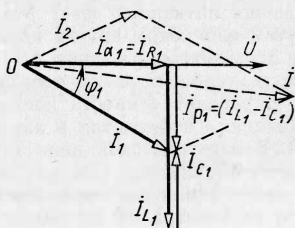


Рис. 4.2

ные параллельные ветви этой цепи как независимые электрические цепи, для каждой из них можно построить векторную диаграмму, исходя из предположения, что $X_{L1} > X_{C1}$ и $X_{L2} < X_{C2}$ (рис. 4.2), так как при активно-

индуктивном характере сопротивления вектор тока I_1 отстает по фазе от вектора напряжения \dot{U} на угол φ_1 , а при активно-емкостном вектор тока I_2 опережает его на угол φ_2 .

Ток I_1 может быть разложен на активную $I_{a1} = I_{R1}$ и реактивную I_{p1} составляющие. С учетом того, что $\cos\varphi_1 = R_1/Z_1 \sin\varphi_1 = (X_{L1} - X_{C1})/Z_1$ и $I_1 = U/Z_1$, из векторной диаграммы рис. 4.2 находим:

$$I_{a1} = I_1 \cos\varphi_1 = \frac{U}{Z_1} \frac{R_1}{Z_1} = U \frac{R_1}{Z_1^2} = U G_1,$$

где $G_1 = R_1/Z_1^2$ — активная проводимость соответствующей ветви электрической цепи.

Принимая во внимание, что в данном случае векторная сумма реактивных составляющих токов в ветви равна алгебраической сумме, имеем

$$\begin{aligned} I_{p1} = I_{L1} - I_{C1} = I_1 \sin\varphi_1 &= \frac{U}{Z_1} \frac{(X_{L1} - X_{C1})}{Z_1} = U \frac{(X_{L1} - X_{C1})}{Z_1^2} = \\ &= U B_1, \end{aligned}$$

где I_{L1} , I_{C1} — реактивная индуктивная и реактивная емкостная составляющие тока I_1 ; Z_1 — полное сопротивление соответствующей ветви цепи переменного тока.

При этом $I_1 = \sqrt{I_{a1}^2 + I_{p1}^2} = U/Z_1 = U(1/Z_1) = U Y_1$.

Таким образом, активную составляющую тока в рассматриваемой ветви электрической цепи можно представить в виде произведения напряжения на активную проводимость ветви, реактивную составляющую тока — в виде произведения напряжения на реактивную проводимость ветви, а ток в рассматриваемой ветви равен напряжению, действующему на зажимах цепи, помноженному на ее полную проводимость.

Для электрической цепи с параллельным соединением сопротивлений, в соответствии с первым законом Кирхгофа для точки разветвления, общий ток I в неразветвленном участке цепи может быть определен как векторная сумма токов в отдельных параллельных ветвях. Этот ток может быть представлен в виде векторной суммы:

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2,$$

где \dot{I}_1 и \dot{I}_2 — комплексные токи в соответствующих параллельных ветвях электрической цепи.

В простейших электрических цепях переменного тока с одним источником питания токи в отдельных парал-

лельных ветвях могут быть определены согласно закону Ома для соответствующих участков цепи:

$$\dot{I}_1 = \dot{U}/\underline{Z}_1 = \underline{Y}_1 \dot{U},$$

$$\dot{I}_2 = \dot{U}/\underline{Z}_2 = \underline{Y}_2 \dot{U},$$

где $\underline{Z}_1 = R_1 + j(X_{L1} - X_{C1})$; $\underline{Z}_2 = R_2 + j(X_{L2} - X_{C2})$ — комплексные сопротивления ветвей, модули которых соответственно равны

$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2} \text{ и } Z_2 = \sqrt{R_2^2 + (X_{L2} - X_{C2})^2};$$

$\underline{Y}_1 = 1/\underline{Z}_1$, $\underline{Y}_2 = 1/\underline{Z}_2$ — комплексные проводимости, определяемые как величины, обратные комплексным сопротивлениям. Для рассматриваемой электрической цепи рис. 4.1 можно получить выражение для общего тока:

$$\dot{I} = \dot{U}/\underline{Z} = \underline{Y} \dot{U},$$

где $\underline{Z} = R + j(X_L - X_C)$ — комплексное сопротивление всей цепи, R , X_L , X_C — активное, реактивное индуктивное и реактивное емкостное сопротивления цепи; $\underline{Y} = 1/\underline{Z}$ — комплексная проводимость цепи.

С учетом этого выражение для токов можно записать в другом виде:

$$\dot{U}/\underline{Z} = \dot{U}/\underline{Z}_1 + \dot{U}/\underline{Z}_2,$$

или $\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2$.

Из этого выражения следует, что комплексная проводимость электрической цепи при параллельном соединении сопротивлений оказывается равной сумме комплексных проводимостей соответствующих параллельных ветвей. Выражение для комплексной проводимости каждой из параллельных ветвей получается путем умножения числителя и знаменателя соответствующей проводимости на сопряженное значение комплексного сопротивления. Для первой ветви цепи с активно-индуктивным характером сопротивлений при $X_{L1} > X_{C1}$ она может быть представлена в виде

$$\underline{Y}_1 = 1/\underline{Z}_1 = 1/[R_1 + j(X_{L1} - X_{C1})] = [R_1 - j(X_{L1} - X_{C1})]/[R_1^2 + (X_{L1} - X_{C1})^2] = R_1/Z_1^2 - j(X_{L1} - X_{C1})/Z_1^2 = G_1 - jB_1.$$

По аналогии с этим могут быть представлены и выражения для \underline{Y}_2 и \underline{Y} с учетом активно-емкостного харак-

тера сопротивлений во второй ветви цепи при $X_{C2} > X_{L2}$ и $X_C < X_L$ (см. рис. 4.2):

$$\underline{Y}_2 = R_2/Z_2^2 - j(X_{L2} - X_{C2})/Z_2^2 = G_2 + jB_2,$$

$$\underline{Y} = R/Z^2 - j(X_L - X_C)/Z^2 = G - jB.$$

При этом $\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = (G_1 + G_2) - j(B_1 - B_2) = G - jB$.

Отсюда в общем случае для произвольного числа параллельных ветвей активная проводимость электрической цепи при параллельном соединении сопротивлений оказывается равной сумме активных проводимостей всех параллельных ветвей, а реактивная проводимость цепи равной алгебраической сумме реактивных проводимостей всех параллельных ветвей, входящих в данную электрическую цепь.

Модуль полной проводимости цепи определяется из выражения

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{(G_1 + G_2)^2 + (B_1 - B_2)^2}.$$

Полная проводимость цепи в то же время является и величиной, обратной ее полному сопротивлению $Y = 1/Z$.

Разделив каждый вектор тока на векторной диаграмме рис. 4.2 на вектор напряжения \dot{U} , можно получить треугольник проводимостей для данной цепи. В качестве примера на рис. 4.3 представлен треугольник проводимостей для первой ветви схемы рис. 4.1.

Из треугольника проводимостей следует, что $\cos\varphi_1 = G_1/Y_1$, а $\sin\varphi_1 = B_1/Y_1 = (B_{L1} - B_{L2})/Y_1$. С учетом этого полная, активная и реактивная мощности цепи могут быть определены через соответствующие проводимости:

$$S_1 = UI_1 = U^2 Y_1, \quad P_1 = UI_1 \cos\varphi_1 = U^2 G_1,$$

$$Q_1 = UI_1 \sin\varphi_1 = U^2 B_1.$$

В электрических цепях переменного тока при параллельном соединении реактивных сопротивлений может возникать резонанс токов. Это происходит в том случае, когда в одних ветвях преобладает реактивное индуктивное сопротивление, а в других — реактивное емкостное сопротивление. Резо-

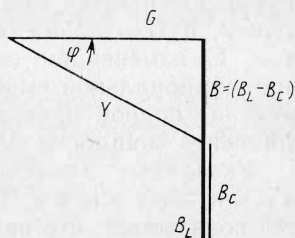


Рис. 4.3

нанс токов (явление резонанса на участке электрической цепи, содержащей параллельно соединенные индуктивный и емкостный элементы) — особое состояние цепи переменного тока при параллельном соединении сопротивлений, при котором реактивная индуктивная проводимость оказывается равной реактивной емкостной проводимости этой цепи, т. е. при условии, что $B_L = B_C$.

Простейшей электрической цепью, в которой может наблюдаться резонанс токов, является цепь с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора.

Полная проводимость рассматриваемой цепи $Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2}$.

Условие резонанса токов ($B_L = B_C$) можно записать через соответствующие параметры электрической цепи. Так как реактивная проводимость катушки, имеющей активное сопротивление R_k , определяется выражением $B_L = X_L/Z_k^2 = \omega L/(R^2 + \omega^2 L^2)$, а проводимость конденсатора без учета его активного сопротивления ($R_C = 0$)

$$B_C = X_C/Z_C^2 = 1/X_C = \omega C,$$

то условие резонанса может быть записано в виде $\omega L/(R_k^2 + \omega^2 L^2) = \omega C$.

Из этого выражения следует, что резонанс токов можно получить при изменении одного из параметров R , L , C и ω при постоянстве других. При некоторых условиях в подобных цепях резонанс может возникать и при одновременном изменении указанных параметров.

Простейшие резонансные цепи, состоящие из параллельно соединенных между собой катушки индуктивности и конденсатора, широко применяются в радиоэлектронике в качестве колебательных контуров, в которых резонанс токов достигается при некоторой определенной частоте поступающего на вход соответствующего устройства сигнала.

В лабораторных условиях наиболее часто резонанс токов достигается при неизменной индуктивности L катушки, путем изменения емкости C батареи конденсаторов. С изменением емкостной проводимости $B_C = \omega C$, пропорциональной емкости конденсатора, происходит изменение полной проводимости Y , общего тока I и коэффициента мощности $\cos\varphi$.

Указанные зависимости называются резонансными кривыми (рис. 4.4). Анализ этих зависимостей показывает, что при увеличении емкости от нуля полная проводимость электрической цепи сначала умень-

шается, достигает при $B_C = B_L$ своего минимума, а затем возрастает с увеличением C , в пределе стремясь к бесконечности. Общий ток $I = YU$, потребляемый цепью, пропорционален полной проводимости. Поэтому характер его изменения подобен характеру изменения проводимости. Коэффициент мощности $\cos \varphi$ с увеличением

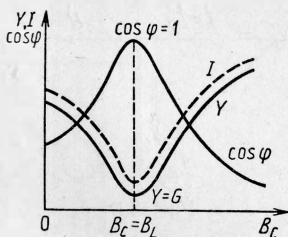


Рис. 4.4

емкости сначала возрастает, а затем уменьшается, в пределе стремясь к нулю, так как $\cos \varphi = G/Y$. В результате анализа указанных зависимостей можно установить, что резонанс токов характеризуется следующими явлениями.

1. При резонансе токов полная проводимость всей электрической цепи приобретает минимальное значение и становится равной активной ее составляющей:

$$Y = \sqrt{G^2 + (B_L - B_C)^2} = G.$$

2. Минимальное значение проводимости обуславливает и минимальное значение тока цепи:

$$I = YU = GU.$$

3. Емкостный ток I_C и индуктивная составляющая I_L тока катушки I_k оказываются при этом равными по величине, а активная составляющая тока катушки I_R становится равной току I , потребляемому из сети:

$$I_L = B_L U = B_C U = I_C; I_R = GU = YU = I.$$

При этом реактивные составляющие тока I_L и I_C (в зависимости от значения реактивных проводимостей) могут приобретать теоретически весьма большие значения и намного превышать ток I , потребляемый электрической цепью из сети.

4. Реактивная составляющая полной мощности, потребляемой цепью, при $B_L = B_C$ оказывается равной нулю:

$$Q = B_L U^2 - B_C U^2 = Q_L - Q_C = 0.$$

При этом индуктивная и емкостная составляющие реактивной мощности также могут приобретать весьма большие значения, оставаясь равными друг другу.

5. Полная мощность цепи при резонансе равна ее активной составляющей

$$S = YU^2 = GU^2 = P.$$

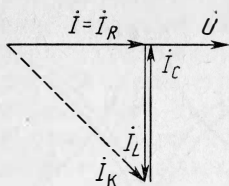


Рис. 4.5

6. Коэффициент мощности всей цепи при резонансе:

$$\cos\varphi = P/S = GU^2/YU^2 = 1.$$

Напряжение и ток электрической цепи при резонансе токов совпадают по фазе. Векторная диаграмма, построенная для условий резонанса

токов применительно к рассматриваемой цепи, представлена на рис. 4.5.

Резонанс токов находит широкое применение в силовых электрических цепях для повышения коэффициента мощности ($\cos\varphi$), так как он имеет большое технико-экономическое значение. Повышение коэффициента мощности обеспечивается подключением конденсаторов (или других источников реактивной емкостной мощности) параллельно потребителям электрической энергии, которые вследствие наличия собственной им индуктивности имеют низкий коэффициент мощности.

Задание по работе

1. Провести экспериментальное исследование разветвленной электрической цепи переменного тока, состоящей из параллельно включенных катушки индуктивности, батареи конденсаторов и резистора, а также параллельных цепей из различных сочетаний указанных элементов.

2. По экспериментальным данным произвести расчет всех проводимостей исследуемых цепей.

3. Экспериментально определить параметры, при которых наступает резонанс токов для данной цепи, и построить резонансные кривые.

4. По полученным данным построить векторные диаграммы токов и напряжения для различных режимов исследуемой цепи.

5. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением резистора, катушки индуктивности и батареи конденсаторов в соответствии с принципиальной схемой, приведенной на рис. 4.6. Соединение элементов цепи и измерительных приборов для измерения напряжения, токов и мощности производится по монтажной схеме рис. 4.7.

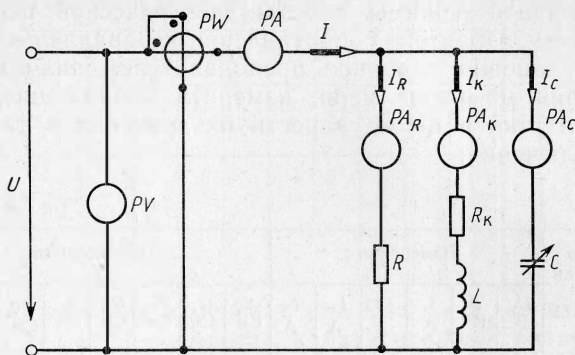


Рис. 4.6

2. Измерить ток, напряжение и мощность на входе электрической цепи с использованием измерительного комплекта К505, а токи в цепи резистора, катушки индуктивности и батареи конденсаторов — с помощью амперметров, установленных на панели № 3 лабораторного стенда. Питание цепи синусоидальным током осуществляется от соответствующего регулируемого источника, расположенного на панели источников стенда.

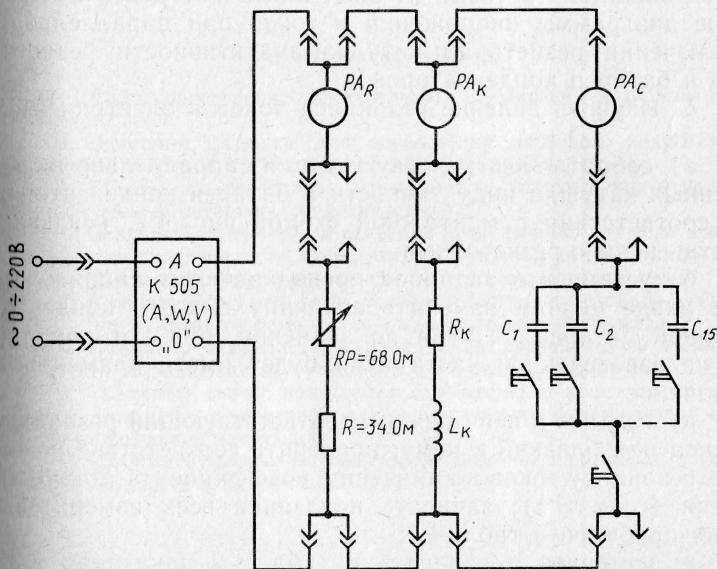


Рис. 4.7

3. Изучить режимы работы электрической цепи при различном характере сопротивлений в параллельных ветвях. Установив заданное преподавателем значение напряжения на входе цепи, измерить напряжение, мощности и токи в цепях, занести их значения в табл. 4.1 при включении:

Т а б л и ц а 4.1

Номера измерений	Измерения						Вычисления							
	U , В	P , Вт	I , А	I_R , А	I_K , А	I_C , А	Y , См	G , См	Y_K , См	G_K , См	B_K , См	B_C , См	$\cos \varphi_K$	$\cos \varphi$
1														
2														
...														

а) резистора, катушки индуктивности и батареи конденсаторов, емкость которой установить равной 80—100 мкФ; б) резистора и батареи конденсаторов; в) резистора и катушки индуктивности; г) катушки индуктивности; д) батареи конденсаторов; е) резистора.

4) По результатам измерений произвести вычисления всех входящих в табл. 4.1 значений и построить векторные диаграммы напряжений и токов при параллельном включении: резистора и катушки индуктивности; резистора и батареи конденсаторов.

5. Изучить явление резонанса токов в электрической цепи:

а) собрать электрическую цепь из параллельно включенных катушки индуктивности и батареи конденсаторов в соответствии с монтажной схемой рис. 4.7, исключив ветвь цепи с резисторами;

б) установить заданное преподавателем напряжение на входе цепи и изменять величину емкости конденсаторной батареи от нуля до значения, при котором ток в неразветвленной части цепи будет иметь наименьшее значение;

в) создать в цепи режим, соответствующий резонансу токов или близкий к нему; проверить соответствие режима резонансу токов по значению коэффициента мощности цепи ($\cos \varphi \approx 1$); записать показания всех измерительных приборов в табл. 4.2;

г) измерить и записать в табл. 4.2 показания всех измерительных приборов еще для четырех режимов иссле-

Таблица 4.2

Номера из- мерений	Измерения					Вычисления							
	U , В	P , Вт	I , А	I_K , А	I_C , А	Y , См	Y_K , См	G_K , См	B_K , См	B_C , См	C , мкФ	$\cos \varphi_K$	$\cos \varphi$
1													
2													
...													

дуемой цепи: два измерения при $C < C_0$ и два измерения при $C > C_0$ (C_0 — емкость конденсаторной батареи при резонансе токов в цепи; C — текущее значение емкости батареи конденсаторов).

6. По данным измерений и вычислений табл. 4.2 построить в масштабе в одной системе координат зависимости общего тока I , полной проводимости Y и коэффициента мощности цепи $\cos \varphi$ от величины емкости C батареи конденсаторов (резонансные кривые).

7. На основании произведенных измерений построить векторные диаграммы токов и напряжений для трех режимов электрической цепи: до резонанса, при резонансе и после резонанса соответственно при $C < C_0$, $C = C_0$ и $C > C_0$.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение параллельного соединения участков электрической цепи.
2. Напишите формулы для определения активной, индуктивной, емкостной и полной проводимостей электрической цепи.
3. Зависит ли реактивная проводимость катушки индуктивности от величины ее активного сопротивления?
4. Поясните, изменится ли активная проводимость катушки при изменении ее индуктивности и неизменном активном сопротивлении.
5. Дайте определение резонанса токов в электрической цепи.
6. В какой цепи и при каких условиях наступает резонанс токов?
7. Чем отличается резонанс токов от резонанса напряжений?
8. Поясните, оказывает ли влияние на потребляемую активную мощность параллельно включенная в электрическую цепь емкость.
9. Объясните способ повышения коэффициента мощности электрической цепи при параллельном включении емкости и потребителя с активно-индуктивной нагрузкой.
10. Поясните технико-экономическое значение повышения коэффициента мощности электрической цепи.

Лабораторная работа 5

Трехфазные электрические цепи при соединении потребителей электроэнергии звездой и треугольником

Цель работы. Исследование режимов работы симметричного и несимметричного потребителей электрической энергии в трехфазных электрических цепях, определение основных соотношений между фазными и линейными значениями токов и напряжений при симметричной нагрузке и включении потребителей звездой и треугольником.

Основные теоретические положения

Электрическая энергия в современных условиях вырабатывается преимущественно источниками энергии с трехфазной системой напряжений. Трехфазные источники широко применяются в технике. Объясняется это тем, что трехфазная система переменного тока является наиболее экономичной. В качестве трехфазных источников напряжений на электрических станциях используются трехфазные синхронные генераторы, на статоре которых размещаются три фазные обмотки (фазы), смещенные в пространстве относительно друг друга на угол 120° . При вращении ротора, выполненного в виде электромагнита постоянного тока, в обмотках генератора будут индуцироваться переменные ЭДС, сдвинутые относительно друг друга по фазе также на 120° ($2\pi/3$):

$$\begin{aligned}e_A &= E_{Am}\sin\omega t; & e_B &= E_{Bm}\sin(\omega t - 2\pi/3); \\e_C &= E_{Cm}\sin(\omega t + 2\pi/3),\end{aligned}$$

где E_{Am} , E_{Bm} и E_{Cm} — значения ЭДС соответственно фаз А, В и С.

Таким образом, под трехфазной системой понимается совокупность электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС (напряжения) одной и той же частоты, сдвинутые относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$, создаваемые общим источником электрической энергии.

Под действием трехфазной системы ЭДС на зажимах трехфазного потребителя создается трехфазная симметричная система напряжений, сдвинутых по фазе на угол 120° , т. е. на угол $2\pi/3$, и имеющих одинаковые ампли-

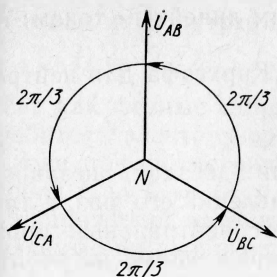


Рис. 5.1

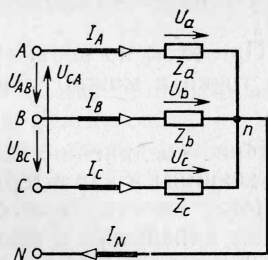


Рис. 5.2

тудные и действующие значения (векторная диаграмма представлена на рис. 5.1).

В трехфазной системе потребители электроэнергии соединяются звездой или треугольником. Передача электрической энергии от источника к потребителю в трехфазной трехпроводной системе осуществляется с помощью линейных проводов. В четырехпроводной трехфазной системе имеется четвертый — нейтральный (Nn) провод, соединяющий общие точки фаз источника и потребителя.

Соединение, при котором концы всех трех фаз потребителя объединяются в общую точку, называемую нейтральной точкой, а начала фаз подсоединяются к трехфазному источнику питания посредством линейных проводов, называется соединением звездой трехфазного потребителя (рис. 5.2). Токи I_A , I_B и I_C в соответствующих линейных проводах называются линейными, токи, протекающие по фазам, — фазными, а ток I_N в нейтральном проводе называется нейтральным.

При рассмотрении трехфазной системы исходим из предположения, что трехфазный источник является симметричным, фазные напряжения которого равны между собой и сдвинуты по фазе относительно друг друга на угол $2\pi/3$. Напряжения между линейными проводами потребителя U_{AB} , U_{BC} и U_{CA} называются линейными, а между началом и концом фаз потребителя, включенного звездой U_a , U_b и U_c , — фазными.

Из схемы рис. 5.2 видно, что при соединении потребителя звездой по его фазам протекают те же токи I_A , I_B и I_C , что и по линейным проводам. Это означает, что при соединении потребителя звездой фазные токи оказы-

ваются равными соответствующим линейным токам: $I_\phi = I_\lambda$.

При этом по первому закону Кирхгофа для нейтральной точки n можно записать

$$I_A + I_B + I_C = I_N.$$

При соединении потребителя звездой, независимо от величины и характера сопротивлений его фаз, а также от того, имеется или отсутствует нейтральный провод, между линейными и фазными напряжениями потребителя существуют следующие соотношения, полученные по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_a - \dot{U}_b; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_b - \dot{U}_c; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_c - \dot{U}_a.$$

В большинстве практических случаев трехфазные потребители представляют собой симметричную нагрузку, подключенную к симметричному трехфазному источнику питания.

Нагрузка, при которой комплексные сопротивления всех фаз потребителя равны между собой ($\underline{Z}_a = \underline{Z}_b = \underline{Z}_c$), называется симметричной. При этом $R_a = R_b = R_c$ и $X_a = X_b = X_c$.

Сопротивления линейных проводов, так же как и сопротивления нейтрального, обычно малы и ими можно пренебречь. При этом линейные напряжения генератора равны линейным напряжениям потребителя и соответственно фазные напряжения генератора равны фазным напряжениям потребителя. В этом случае векторная диаграмма напряжений потребителя будет совпадать с векторной диаграммой напряжений генератора. Исходя из полученных уравнений и построений, можно сделать вывод, что линейные напряжения потребителя, так же как и фазные, сдвинуты относительно друг друга на угол $2\pi/3$ (рис. 5.3).

Из векторной диаграммы следует, что при соединении потребителя электроэнергии звездой при симметричной нагрузке между фазными и линейными напряжениями существует соотношение:

$$U_\lambda = \sqrt{3} U_\phi.$$

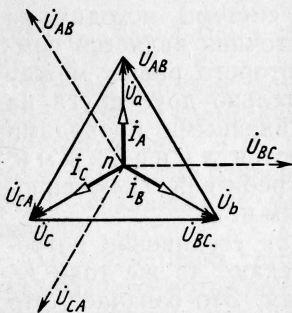


Рис. 5.3

Фазные токи потребителя определяют по закону Ома:

$$I_A = \dot{U}_a / \underline{Z}_a, \quad I_B = \dot{U}_b / \underline{Z}_b \text{ и } I_C = \dot{U}_c / \underline{Z}_c.$$

Так как фазные напряжения и фазные сопротивления потребителя электроэнергии равны между собой, то фазные токи при симметричной нагрузке также равны между собой $I_A = I_B = I_C = I_\phi$ и сдвинуты относительно фазных напряжений на равные углы $\varphi_a = \varphi_b = \varphi_c = \varphi_\phi$, определяемые из выражения

$$\operatorname{tg} \varphi_a = X_a / R_a = \operatorname{tg} \varphi_b = X_b / R_b = \operatorname{tg} \varphi_c = X_c / R_c.$$

При симметричной нагрузке ток в нейтральном проводе, определяемый как векторная сумма фазных токов, оказывается равным нулю, поэтому при симметричной нагрузке этот провод становится не нужным и применять его нет смысла. При несимметричной нагрузке комплексные сопротивления всех трех фаз в общем случае не равны между собой, т. е. $\underline{Z}_a \neq \underline{Z}_b \neq \underline{Z}_c$.

Пренебрегая сопротивлениями линейных проводов, можно считать, что линейные напряжения потребителя независимо от характера нагрузки равны соответствующим линейным напряжениям генератора, т. е. система линейных напряжений и при несимметричной нагрузке симметрична.

При включении нейтрального провода и несимметричной нагрузке (сопротивлением нейтрального провода пренебрегаем) потенциал нейтральной точки потребителя равен потенциалу нейтральной точки генератора. Следовательно, фазные напряжения потребителя равны соответствующим фазным напряжениям генератора.

При наличии нейтрального провода и несимметричной нагрузке геометрическая сумма фазных токов трехфазной системы в соответствии с первым законом Кирхгофа для нейтральной точки равна току в нейтральном проводе

$$I_A + I_B + I_C = I_N \neq 0.$$

При этом векторная диаграмма для несимметричной нагрузки с нейтральным проводом имеет вид, представленный на рис. 5.4.

При отключении нейтрального провода потенциал нейтральной точки n потребителя электроэнергии не равен потенциалу нейтральной точки N генератора при несимметричной нагрузке, так как эти точки не соединены между собой. При этом нейтральная точка n на вектор-

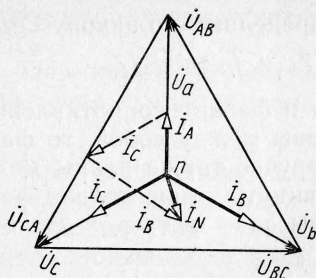


Рис. 5.4

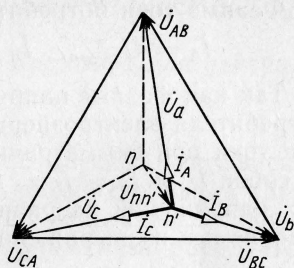


Рис. 5.5

ной диаграмме потребителя сместится из своего первоначального положения в другое (n'), при котором геометрическая сумма фазных токов потребителя равна нулю:

$$\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0.$$

В этом случае векторная диаграмма принимает вид, представленный на рис. 5.5, из которой следует, что при несимметричной нагрузке в трехфазной системе без нейтрального провода фазные напряжения потребителя оказываются не равными друг другу. При этом на одних фазах может быть пониженное напряжение по сравнению с фазными напряжениями генератора, а на других — повышенное.

В этом случае между фазными токами, напряжениями и сопротивлениями существуют те же соотношения, обусловленные законом Ома, что и при симметричной нагрузке.

Короткое замыкание одной фазы потребителя электроэнергии, соединенного звездой без нейтрального провода, следует рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, при котором напряжение на короткозамкнутой фазе потребителя становится равным нулю, а напряжение на двух других фазах увеличивается до значений, равных линейным напряжениям (рис. 5.6). Нейтральная точка n на векторной диаграмме смещается в этом случае в вершину треугольника линейных напряжений (n'), соответствующую короткозамкнутой фазе. При этом напряжение $\dot{U}_{nn'}$ между нейтральными точками генератора и потребителя становится равным фазному напряжению питающего генератора.

Ток в короткозамкнутой фазе зависит от сопротивлений, включенных в двух других фазах потребителя.

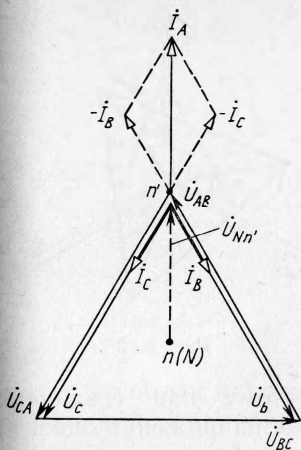


Рис. 5.6

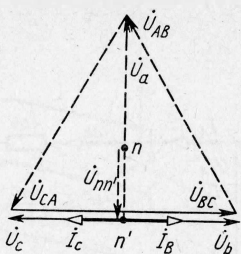


Рис. 5.7

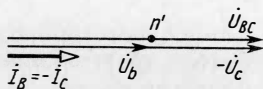


Рис. 5.8

Геометрическая сумма векторов всех трех фазных токов в этом случае равна нулю.

Отключение нагрузки одной из фаз в трехфазной системе при соединении потребителя электроэнергии звездой без нейтрального провода можно также рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, при которой сопротивление отключенной фазы равно бесконечности. При этом если сопротивления двух других фаз оказываются равными, то нейтральная точка n на векторной диаграмме переместится в середину одной из сторон треугольника (n') линейных напряжений (рис. 5.7).

При обрыве линейного провода трехфазный потребитель находится под линейным напряжением, так как при этом ни одна из точек нагрузки не будет под потенциалом оборванного линейного провода. В этом случае векторная диаграмма трехфазного потребителя при соединении звездой и отсутствии нейтрального провода приобретает вид, представленный на рис. 5.8.

Соединение, при котором конец первой фазы x соединяется с началом второй b , конец второй y — с началом третьей c , а конец третьей z — с началом первой a , называется соединением трехфазного потребителя электрической энергии треугольником. При этом начала всех фаз потребителя присоединяются к источнику электрической энергии с помощью линейных проводов. Из рис. 5.9 видно, что каждая фаза потребителя присоединяется соответственно к

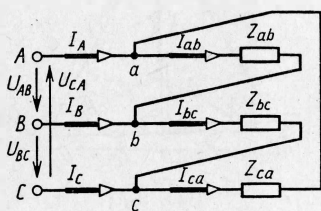


Рис. 5.9

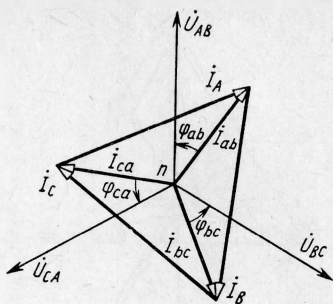


Рис. 5.10

двум линейным проводам. Поэтому при соединении потребителя треугольником фазные напряжения оказываются равными соответствующим линейным напряжениям: $U_{\phi} = U_{\text{л}}$. Фазные токи при соединении трехфазного потребителя треугольником не равны линейным, так как в начале каждой фазы потребителя имеется узел разветвления токов. При этом независимо от сопротивлений потребителя между фазными и линейными токами существуют соотношения, полученные на основании первого закона Кирхгофа для узлов разветвления токов:

$$I_A = I_{ab} - I_{ca}; \quad I_B = I_{bc} - I_{ab}; \quad I_C = I_{ca} - I_{bc}.$$

Пользуясь указанными соотношениями, по векторам фазных токов I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} можно построить векторы линейных токов I_A , I_B и I_C .

Соотношения между фазными напряжениями, токами и сопротивлениями при соединении потребителя треугольником определяются в соответствии с законом Ома: $I_{ab} = \dot{U}_{AB}/Z_{ab}$; $I_{bc} = \dot{U}_{BC}/Z_{bc}$; $I_{ca} = \dot{U}_{CA}/Z_{ca}$.

Углы сдвига по фазе между векторами фазных напряжений \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} и соответствующих фазных токов I_{ab} , I_{bc} , I_{ca} определяются фазными сопротивлениями потребителя: $\varphi_{ab} = \arctg X_{ab}/R_{ab}$; $\varphi_{bc} = \arctg X_{bc}/R_{bc}$; $\varphi_{ca} = \arctg X_{ca}/R_{ca}$.

При симметричной нагрузке комплексные сопротивления всех трех фаз одинаковы, т. е. $Z_{ab} = Z_{bc} = Z_{ca}$. При этом как активные, так и реактивные сопротивления фаз потребителя равны: $R_{ab} = R_{bc} = R_{ca}$; $X_{ab} = X_{bc} = X_{ca}$, причем реактивные сопротивления имеют одинаковый (индуктивный или емкостный) характер. В этом случае фазные токи и соответствующие углы сдвига по фазе

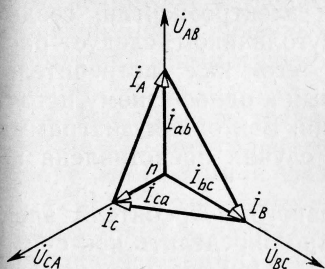


Рис. 5.11

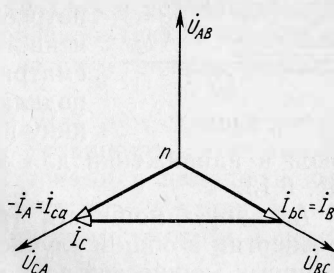


Рис. 5.12

между фазными напряжениями и фазными токами будут равны между собой: $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_{\phi}$, $\varphi_{ab} = \varphi_{bc} = \varphi_{ca} = \varphi_{\phi}$.

Таким образом, при соединении трехфазного потребителя электроэнергии треугольником при симметричной нагрузке токи всех трех фаз равны между собой и сдвинуты относительно соответствующих линейных напряжений на одинаковые углы. Из векторной диаграммы для симметричной нагрузки при соединении потребителя треугольником, представленной на рис. 5.10, видно, что линейные токи оказываются равными и сдвинутыми относительно друг друга по фазе на угол $2\pi/3$. При этом между фазными и линейными токами при симметричной нагрузке и соединении потребителя треугольником существует соотношение:

$$I_L = \sqrt{3} I_{\phi}.$$

При несимметричной нагрузке фазные токи и углы сдвига по фазе между фазными токами и фазными напряжениями в общем случае не одинаковы. Так же как и при симметричной нагрузке, они могут быть определены по соответствующим формулам. Линейные токи и в этом случае определяются через соответствующие фазные токи. Векторная диаграмма, построенная для случая несимметричной активной нагрузки трехфазного потребителя при соединении треугольником, представлена на рис. 5.11.

Отключение нагрузки одной из фаз следует рассматривать как частный случай несимметричной нагрузки, когда сопротивление отключенной фазы равно бесконечности. В этом случае векторная диаграмма приобретает вид, представленный на рис. 5.12.

При обрыве линейного провода в цепи трехфазного

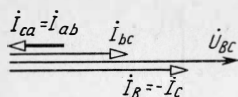


Рис. 5.13

потребителя электроэнергии, соединенного треугольником, следует рассматривать его как потребитель, подключенный к однофазному источнику питания. Векторная диаграмма токов и напряжений для этого случая представлена на рис. 5.13.

Активную мощность трехфазного потребителя электроэнергии в общем случае можно определить как сумму активных мощностей всех его фаз. При соединении звездой активная мощность потребителя

$$P = P_a + P_b + P_c = U_a I_a \cos \varphi_a + U_b I_b \cos \varphi_b + U_c I_c \cos \varphi_c.$$

При соединении треугольником

$$P = P_{ab} + P_{bc} + P_{ca} = U_{AB} I_{ab} \cos \varphi_{ab} + U_{BC} I_{bc} \cos \varphi_{bc} + U_{CA} I_{ca} \cos \varphi_{ca}.$$

При симметричной нагрузке фазные напряжения, токи и углы сдвига фаз оказываются равными. Вследствие этого равны также и активные мощности всех трех фаз потребителя электроэнергии.

Активная мощность трехфазного потребителя независимо от схемы его соединения может быть найдена через линейные токи и напряжения:

$$P = 3P_\phi = 3U_\phi I_\phi \cos \varphi_\phi = \sqrt{3} U_L I_L \cos \varphi.$$

Аналогично можно получить и формулу для реактивной мощности трехфазного потребителя при симметричной нагрузке:

$$Q = \sqrt{3} U_L I_L \sin \varphi.$$

Полная мощность трехфазного потребителя при симметричной нагрузке

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3} U_L I_L.$$

Задание по работе

1. Исследовать трехпроводную трехфазную электрическую цепь при соединении потребителей электроэнергии звездой и установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при симметричном и несимметричном режимах работы.

2. Исследовать четырехпроводную трехфазную цепь

при соединении потребителей звездой и установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями при симметричном и несимметричном режимах работы.

3. Исследовать трехфазную цепь при соединении потребителей треугольником и установить соотношения между линейными и фазными токами и напряжениями.

4. Для исследуемых цепей построить векторные диаграммы токов и напряжений при симметричном и несимметричном режимах работы.

5. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с измерительными приборами и оборудованием, используемыми при выполнении работы, а также со схемой включения измерительного комплекта К505 при измерениях токов, напряжений и мощностей в трехфазных трехпроводных и четырехпроводных электрических цепях.

2. Исследовать трехфазную цепь при соединении потребителей электрической энергии звездой (см. рис. 5.2).

3. Собрать трехпроводную трехфазную цепь (см.

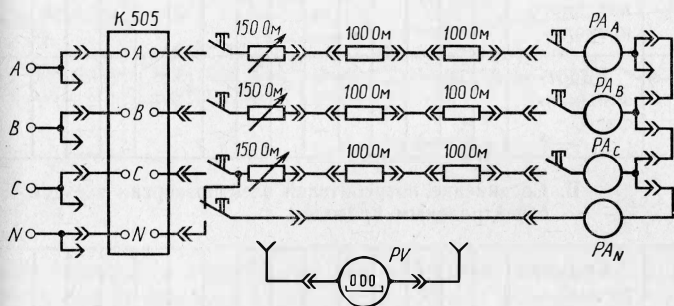


Рис. 5.14

рис. 5.2) по монтажной схеме рис. 5.14, используя в качестве нагрузки каждой фазы последовательно включенные резисторы.

4. Измерить токи и мощности по фазам с помощью измерительного комплекта К505. Измерение фазных и линейных напряжений осуществить цифровым вольтметром, установленным на панели стенда, поочередно подключая его к соответствующим точкам цепи. Питание цепи про-

изводить от трехфазного источника, расположенного на панели источников питания с линейным напряжением 220 В.

5. Изменяя сопротивление переменных резисторов в фазах трехфазной цепи, измерить и записать в табл. 5.1

Т а б л и ц а 5.1

Номера изме- рений	Режим рабо- ты цепи	Измерения												Вычисления	
		I_A, A	I_B, A	I_C, A	I_N, A	$P_a, Вт$	$P_b, Вт$	$P_c, Вт$	$U_a, В$	$U_b, В$	$U_c, В$	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$P, Вт$
															—

А. Соединение потребителей электроэнергии звездой без нейтрального провода

1	Симметричный															
2	Несимметричный															
3	Обрыв фазы															
4	Обрыв линейного провода															
5	Короткое замыкание фазы															

Б. Соединение потребителей электроэнергии звездой с нейтральным проводом

1	Симметричный															
2	Несимметричный															

Примечания: 1. Обрыв линейного провода производить отключением штекерного соединителя от источника питания. 2. При включении трехфазного потребителя по трехпроводной схеме и несимметричной нагрузке показания ваттметра комплекта К505 при измерении фазных мощностей P_a , P_b и P_c не соответствуют действительным фазным мощностям, так как потенциальная обмотка ваттметра подключена к искусственной нулевой точке, суммарная же мощность потребителя $P = P_a + P_b + P_c$ соответствует действительной мощности.

Значения линейных токов, фазных и линейных напряжений, а также показания ваттметра для различных режимов работы цепи.

6. Подключить к исследуемой трехпроводной трехфазной цепи нейтральный провод. Для этого соединить соединителем штекерное гнездо 0 источника питания с соответствующей генераторной клеммой измерительного комплекта, а нагрузочную клемму измерительного комплекта — с соответствующим нагрузке штекерным гнездом.

7. Измерить все токи, напряжения и мощности при симметричном и несимметричном режимах работы цепи, результаты измерений записать в табл. 5.1.

8. Исследовать трехфазную цепь при соединении потребителей электрической энергии треугольником (см. рис. 5.9).

9. Собрать электрическую цепь (см. рис. 5.9) по монтажной схеме, приведенной на рис. 5.15.

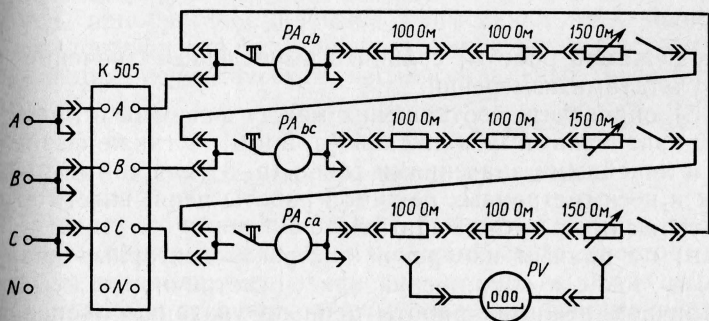


Рис. 5.15

10. Измерить линейные токи и фазные активные мощности измерительным комплектом К505, а линейные напряжения — цифровым вольтметром.

Для измерения фазных токов использовать амперметры на панели стенда с пределом измерения 1 А.

11. Изменяя сопротивления переменных резисторов, измерить и записать в табл. 5.2 значения линейных и фазных токов, линейных напряжений, а также показания ваттметра для различных режимов работы цепи.

12. Обработать результаты измерений по п. 2, 6 и 8;

а) подсчитать активные мощности отдельных фаз $P_\phi = I_\phi U_\phi$ и общую мощность $P = \sum P_\phi$ для симметрич-

Таблица 5.2

Номера измерений	Режим работы цепи	Измерения											Вычисления		
		I_A, A	I_B, A	I_C, A	$P_a, Вт$	$P_b, Вт$	$P_c, Вт$	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	I_{ab}, A	I_{bc}, A	I_{ca}, A	$P, Вт$	I_λ/I_ϕ
															—
1	Симметричный														
2	Несимметричный														
3	Обрыв фазы														
4	Обрыв линейного провода														

ных режимов работы; сравнить вычисленные значения с результатами измерений;

б) определить соотношения между фазными и линейными значениями напряжений (п. 2 и 6), а также фазными и линейными значениями токов (п. 8) для симметричных и несимметричных режимов работы цепи; внести эти соотношения в табл. 5.1 и 5.2;

в) по данным измерений построить векторные диаграммы токов и напряжений при симметричном и несимметричном режимах работы цепи по указанию преподавателя.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение трехфазной системы синусоидального тока.
2. Поясните преимущества трехфазной системы синусоидального тока в сравнении с однофазной системой.
3. Укажите способы соединения потребителей электроэнергии в трехфазной системе.
4. Объясните назначение нейтрального провода и поясните, почему в этот провод не включаются разъединители и предохранители.
5. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении потребителей электроэнергии звездой и треугольником?
6. Укажите способы включения ваттметров для измерения активной мощности в четырехпроводных и трехпроводных трехфазных электрических цепях.

7. Объясните, почему опасно короткое замыкание фазы потребителя электроэнергии в четырехпроводной системе трехфазной цепи.

8. Укажите условия симметрии трехфазного потребителя электроэнергии.

9. Как изменятся напряжения и токи потребителя электроэнергии в четырехпроводной трехфазной симметричной системе при отключении нейтрального провода?

10. Поясните, в каком случае нельзя использовать метод двух ваттметров при измерении активной мощности трехфазного потребителя электроэнергии.

Лабораторная работа 6

Переходные процессы в линейных электрических цепях

Цель работы. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях при наличии одного и двух накопителей энергии, установление влияния параметров исследуемой цепи на характер переходного процесса, приобретение навыков применения электронного осциллографа для исследования и измерения быстропротекающих периодических несинусоидальных электрических величин.

Основные теоретические положения

Наряду с установившимися режимами работы в линейных электрических цепях имеют место электромагнитные переходные процессы, происходящие в этих цепях при переходе от одного установившегося режима к другому.

Под действием периодических или постоянных ЭДС и напряжений переходные процессы в электрических цепях возникают при включении и выключении цепи, а также при изменении одного или нескольких ее параметров*.

Переходные процессы в электрических цепях не могут протекать мгновенно, так как в установившемся режиме любая электрическая цепь характеризуется определенным запасом энергии электрических или магнитных полей элементов цепи. Поэтому в реальных электрических

* Мгновенное изменение состояния электрической цепи, обуславливающее возникновение переходного процесса или изменение режима ее работы, называется коммутацией.

цепях токи и напряжения на отдельных участках не могут мгновенно менять свои значения.

Однако при пренебрежении магнитным или электрическим полем на том или ином участке электрической цепи, ввиду их незначительности, можно считать, что ток или напряжение на соответствующем участке цепи изменяется практически мгновенно. В соответствии с законами коммутации электрических цепей не могут мгновенно изменяться на конечное значение токи в катушках индуктивности (первый закон коммутации), однако напряжения на зажимах подобных катушек можно принять изменяющимися мгновенно, если пренебречь их электрической емкостью.

В то же время не может мгновенно меняться на конечное значение напряжение на обкладках конденсаторов (второй закон коммутации), хотя, если пренебречь индуктивностью конденсаторов, теоретически возможны мгновенные изменения токов в их цепях.

Переходные процессы в линейных электрических цепях описываются линейными дифференциальными уравнениями, составленными по первому и второму законам Кирхгофа, которые могут быть сведены к одному уравнению для любого переходного тока или напряжения в цепи.

Решение неоднородного дифференциального уравнения классическим методом возможно в результате суммирования частного решения данного неоднородного уравнения и его общего решения при равенстве нулю свободного члена, т. е. однородного дифференциального уравнения.

При этом решение однородного уравнения без свободного члена описывает процессы, происходящие в электрической цепи при отсутствии внешних источников питания, когда они происходят под действием энергии, накопленной в электрическом и магнитном полях элементов.

В реальных электрических цепях происходит рассеяние энергии, в результате чего запас накопленной в соответствующих элементах цепи энергии со временем будет исчерпан и, следовательно, все электромагнитные процессы в цепи через определенный промежуток времени прекратятся.

С учетом этого можно утверждать, что переходящие или свободные составляющие i'' и u'' тока и напряжения, определяемые общим решением дифференциального однородного уравнения, стремятся к нулю.

В результате частного решения неоднородного дифференциального уравнения представляется возможным получить установившиеся или принужденные составляющие тока и напряжения i' и u' , имеющие место при установившемся режиме, т. е. при законченном переходном процессе.

При протекании переходного процесса в электрической цепи ток и напряжение можно записать как суммы: $i = i' + i''$, $u = u' + u''$. При интегрировании дифференциальных уравнений появляются постоянные интегрирования, число которых определяется порядком соответствующего уравнения. При определении постоянных интегрирования принимаются начальные условия, характеризующие состояние электрической цепи в соответствующий момент времени. При этом число начальных условий равно числу постоянных интегрирования.

Переходные процессы в неразветвленной электрической цепи с параметрами R , L и C описываются дифференциальным уравнением для мгновенных значений напряжений, составленным по второму закону Кирхгофа для соответствующей цепи:

$$Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt = u.$$

После дифференцирования

$$L \frac{d^2 i}{dt^2} + R \frac{di}{dt} + \frac{i}{C} = \frac{du}{dt}.$$

Для определения принужденной (установившейся) составляющей переходного тока, когда воздействующая функция $u(t)$ постоянна или является периодической, необходимо найти его значение в установившемся режиме.

Для определения переходящей (свободной) составляющей тока переходного процесса находят решение дифференциального уравнения без свободного члена:

$$L d^2 i / dt^2 + R di / dt + i / C = 0.$$

При этом соответствующее характеристическое уравнение имеет вид

$$Lp^2 + Rp + 1/C = 0.$$

Корни этого уравнения:

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\left(\frac{R}{2L}\right)^2 - \frac{1}{LC}}.$$

Свободная составляющая тока переходного процесса:

$$i''(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t},$$

где e — основание натуральных логарифмов.

Постоянные интегрирования A_1 и A_2 , входящие в уравнение, определяют, исходя из начальных условий.

Ток переходного процесса

$$i(t) = i'(t) + i''(t).$$

Аналогично можно определить напряжение и другие электрические и магнитные величины на любом участке линейной электрической цепи в переходном режиме.

При включении электрической цепи с R и L под постоянное напряжение (рис. 6.1) переходный процесс

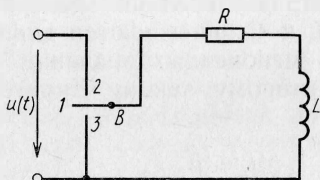


Рис. 6.1

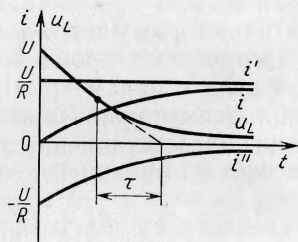


Рис. 6.2

описывается дифференциальным уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа (при переключении выключателя B из положения 1 в положение 2): $Ri + L \frac{di}{dt} = u(t) = U$. Характеристическое уравнение, соответствующее полученному дифференциальному уравнению, имеет вид $R + Lp = 0$, где $p = -R/L$ — корень характеристического уравнения.

Так как данное дифференциальное уравнение является уравнением первого порядка, то оно характеризуется единственным корнем.

С учетом этого выражение для свободной составляющей тока переходного процесса приводят к виду

$$i''(t) = A e^{p t} = A e^{-\frac{R}{L} t}.$$

Так как воздействующее на электрическую цепь напряжение $u(t)$ постоянно, значение принужденной составляющей тока цепи в переходном режиме оказывается рав-

ным его установившемуся значению: $i' = U/R$. Ток в цепи при переходном процессе:

$$i(t) = i'(t) + i''(t) = U/R + Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

Постоянную интегрирования A определяют из начальных условий. Так как в цепи с индуктивностью ток не может измениться скачком, то при $t = 0$ ток в ней равен нулю: $i(0) = U/R + A = 0$. Отсюда $A = -U/R$, тогда

$i''(t) = -\frac{U}{R}e^{-\frac{R}{L}t}$. С учетом этого выражение для тока переходного процесса приобретает вид

$$\begin{aligned} i(t) &= i'(t) + i''(t) = \frac{U}{R} - \frac{U}{R}e^{-\frac{R}{L}t} = \\ &= \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{R}{L}t}) = \frac{U}{R}(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}), \end{aligned}$$

где $\tau = L/R$ — постоянная времени электрической цепи, равная промежутку времени, по истечении которого свободная составляющая тока в цепи изменяется в e раз по сравнению со своим исходным значением.

Напряжение переходного процесса на индуктивности, уравнивающее ЭДС самоиндукции, можно определить по уравнению

$$\begin{aligned} u_L(t) &= L \frac{di}{dt} = L d \left[\frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}}) \right] / dt = \\ &= L \frac{U}{R\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = U e^{-\frac{t}{\tau}}. \end{aligned}$$

На рис. 6.2 представлены временные зависимости тока в электрической цепи и напряжения на индуктивности при переходном процессе. Во время переходного процесса ток в цепи постепенно возрастает от нуля, асимптотически приближаясь к своему установившемуся значению, равному U/R , в то время как напряжение на индуктивности, равное напряжению U при $t = 0$, убывает, асимптотически приближаясь к нулю.

Постоянная времени электрической цепи может быть определена графически как длина подкасательной, проведенной в любой точке к кривой, соответствующей рассматриваемой показательной функции времени (рис. 6.2).

При коротком замыкании RL -цепи, присоединенной к источнику постоянного напряжения U (см. рис. 6.1)

выключатель B из положения 2 перебрасывается в положение 3), в цепи возникает переходный процесс, обусловленный наличием запаса энергии в магнитном поле катушки с индуктивностью L .

Происходящий в короткозамкнутом контуре $R - L$ процесс характеризуется свободным током, так как принужденный (установившийся) ток при этом оказывается равным нулю ($i' = 0$). В результате ток переходного процесса в данном случае определяется его свободной составляющей:

$$i(t) = i''(t) = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{R}{L}t}.$$

Постоянную интегрирования определяют, исходя из условия, что до момента короткого замыкания ток в цепи

$$i(0) = I = U/R = A.$$

С учетом этого ток переходного процесса

$$i(t) = i''(t) = \frac{U}{R}e^{-\frac{R}{L}t} = \frac{U}{R}e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Из временной зависимости тока в переходном процессе (рис. 6.3) следует, что ток в электрической цепи

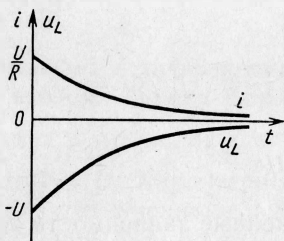


Рис. 6.3

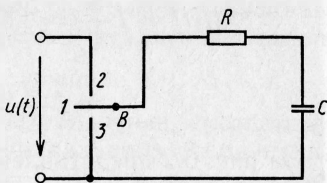


Рис. 6.4

уменьшается по экспоненциальной зависимости от значения, равного U/R в момент короткого замыкания при $t = 0$, до нуля — в конце переходного процесса. По аналогичной зависимости изменяется в данной цепи и напряжение на индуктивности:

$$\begin{aligned} u_L(t) &= L \frac{di}{dt} = L d \left(\frac{U}{R} e^{-\frac{R}{L}t} \right) / dt = \\ &= L \frac{U}{R} \left(-\frac{R}{L} \right) e^{-\frac{R}{L}t} = -U e^{-\frac{t}{\tau}}. \end{aligned}$$

При включении RC -цепи (рис. 6.4) под постоянное напряжение $u(t) = U$ (выключатель B устанавливается при этом из положения 1 в положение 2) принято, что к моменту включения ($t = 0$) конденсатор не был заряжен ($u_c = 0$). В соответствии с этим, исходя из уравнения электрического равновесия для мгновенных напряжений, записанного по второму закону Кирхгофа для рассматриваемой RC -цепи при $t \geq 0$, имеем $Ri + u_c = u(t) = U$. Ток в рассматриваемой цепи можно представить через емкость конденсатора C и изменение напряжения на его обкладках: $i = C \frac{du_c}{dt}$. В результате дифференциальное уравнение цепи приводят к виду

$$RC \frac{du_c}{dt} + u_c = u(t) = U.$$

Данному дифференциальному уравнению соответствует характеристическое уравнение $RCp + 1 = 0$, где p — корень характеристического уравнения $p = -1/RC$.

Решение дифференциального уравнения без свободного члена относительно напряжения на конденсаторе позволяет определить свободную составляющую этого напряжения: $u_c''(t) = Ae^{pt} = Ae^{-\frac{t}{RC}}$.

В свою очередь, напряжение u_c' на обкладках конденсатора в установившемся режиме определяют в результате частного решения соответствующего дифференциального уравнения электрической цепи. В установившемся режиме ток в цепи $i'(t) = 0$, следовательно, $u_c'(t) = u(t) = U$.

Напряжение на конденсаторе во время переходного процесса

$$u_c(t) = u_c'(t) + u_c''(t) = U + Ae^{-\frac{t}{RC}}.$$

Постоянная интегрирования A находится из начальных условий. Напряжение на конденсаторе до включения равнялось нулю $u_c(0) = 0$, так как к моменту включения цепи конденсатор не был заряжен. Тогда $u_c(0) = U + A = 0$, откуда $A = -U$ и $u_c''(t) = -Ue^{-\frac{t}{RC}}$.

Таким образом, временная зависимость напряжения на обкладках конденсатора во время переходного процесса определяется уравнением

$$u_c(t) = U - Ue^{-\frac{t}{RC}} = U(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}),$$

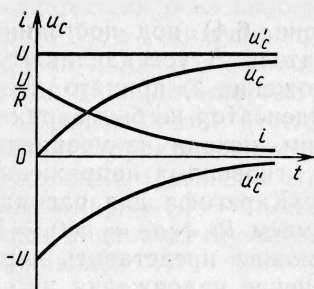


Рис. 6.5

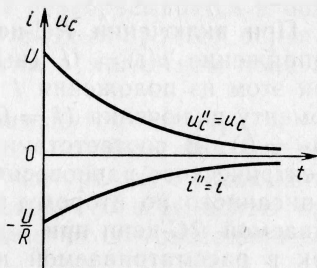


Рис. 6.6

где $\tau = RC$ — постоянная времени, равная промежутку времени, по истечении которого напряжение в цепи изменяется в e раз по сравнению со своим исходным значением.

Ток в цепи при переходном процессе

$$i(t) = i'(t) + i''(t) = C \frac{du_c}{dt} = C \frac{du'_c}{dt} + C \frac{du''_c}{dt} =$$

$$= 0 + \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $i'(t) = 0$, $i''(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$ и $i(t) = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}$.

Анализ полученных временных зависимостей напряжения на конденсаторе и тока в RC -цепи во время переходного процесса (рис. 6.5) показывает, что с течением времени напряжение на конденсаторе возрастает, стремясь к установившемуся своему значению, равному U , а ток убывает от значения, равного U/R , до нуля.

При этом изменение напряжения на конденсаторе и тока в цепи при переходном режиме происходит тем быстрее, чем меньше постоянная времени цепи $\tau = RC$.

Короткое замыкание неразветвленной RC -цепи, ранее находившейся под постоянным напряжением $U = \text{const}$, осуществляется переключением выключателя B из положения 2 (в момент времени $t = 0$) в положение 3 (рис. 6.4). Электромагнитные процессы в рассматриваемой электрической цепи с момента ее замыкания происходят за счет энергии, сосредоточенной ко времени $t = 0$ в электрическом поле конденсатора. Эта энергия, равная $\frac{1}{2}CU^2$, в течение переходного процесса преобразуется в теплоту, рассеиваемую резистором R .

Для установившихся значений тока в RC -цепи и напряжения на обкладках конденсатора при переходном режиме $i'(t) = 0$, $u'_C(t) = 0$.

При этом свободные составляющие тока в цепи и напряжения на конденсаторе

$$i''(t) = -\frac{A}{R}e^{-\frac{t}{RC}}, \quad u''_C(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}}.$$

Ток в цепи и напряжение на обкладках конденсатора в переходном режиме выражаются уравнениями:

$$i(t) = i'(t) + i''(t) = -\frac{A}{R}e^{-\frac{t}{RC}},$$

$$u_C(t) = u'_C(t) + u''_C(t) = Ae^{-\frac{t}{RC}}.$$

Постоянная интегрирования A находится из начальных условий, так как при $t = 0$ напряжение на обкладках конденсатора равно U , т. е. $u_C(0) = U = A$.

Тогда для переходных значений тока и напряжения на конденсаторе справедливы уравнения:

$$i(t) = -\frac{U}{R}e^{-\frac{t}{RC}} \quad \text{и} \quad u_C(t) = Ue^{-\frac{t}{RC}}.$$

Временные зависимости для тока и напряжения на обкладках конденсатора во время переходного процесса представлены на рис. 6.6, из которого видно, что напряжение и ток при коротком замыкании RC -цепи убывают по экспоненциальным зависимостям в соответствии с постоянной времени $\tau = RC$ -цепи.

При расчете переходных процессов в линейных разветвленных электрических цепях для определения токов в отдельных ветвях и напряжений на участках цепи записывается соответствующее число уравнений, составленных по первому и второму законам Кирхгофа. При этом при составлении характеристического уравнения не обязательно приводить систему уравнений к одному уравнению относительно одной неизвестной функции.

Система однородных дифференциальных уравнений, записанных для свободных составляющих токов в ветвях разветвленной цепи, записывается в виде соответствующей системы алгебраических уравнений и в отличие от исходной системы не содержит производных и интегра-

лов. В этой системе уравнений производные свободной составляющей тока di''/dt заменяются символом pi'' , а интеграл от этого тока $\int i'' dt$ — символом i''/p (p — корень характеристического уравнения — показатель затухания, одинаковый для всех свободных составляющих токов цепи).

Действительно, если $i'' = Ae^{pt}$, то производная от свободного тока $di''/dt = d(Ae^{pt})/dt = pAe^{pt} = pi''$, а интеграл $\int i'' dt = \int Ae^{pt} dt = Ae^{pt}/p = i''/p$. Постоянная интегрирования при этом оказывается равной нулю, так как свободные составляющие не содержат не зависящих от времени слагаемых. Подобный переход от системы линейных дифференциальных уравнений к системе алгебраических уравнений, называемый алгебраизацией системы дифференциальных уравнений, для свободных токов значительно упрощает составление характеристического уравнения. Из полученной системы алгебраических уравнений составляют затем определитель $\Delta(p)$, который должен равняться нулю, так как данная система уравнений имеет решение, отличное от нулевого, если определитель системы равен нулю.

Выражение $\Delta(p) = 0$ и будет характеристическим уравнением, в котором единственным неизвестным является его корень p . Для составления характеристического уравнения системы однородных дифференциальных уравнений (уравнений без свободного члена) может быть использован и другой прием. Записывается выражение входного комплексного сопротивления $\underline{Z}(j\omega)$ для соответствующей цепи, в котором $j\omega$ заменяют символом p . Полученное обобщенное комплексное сопротивление $\underline{Z}(p)$ приравнивают нулю. Уравнение $\underline{Z}(p) = 0$ и будет характеристическим уравнением рассматриваемой цепи.

Число корней характеристического уравнения определяется его степенью. Для характеристического уравнения второй степени число корней равно двум. При этом корни могут быть: действительными, неравными, отрицательными; действительными, равными, отрицательными; комплексными, сопряженными, с отрицательной действительной частью.

Таким образом, если характеристическое уравнение имеет n корней, общее решение системы однородных дифференциальных уравнений имеет вид

$$i''(t) = \sum_{k=1}^n A_k e^{p_k t},$$

где p_k — корни характеристического уравнения; A_k — постоянные интегрирования.

При двух действительных неравных корнях

$$i''(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Для нахождения постоянных интегрирования необходимо решить систему уравнений для искомого свободного тока $i''(t)$, соответствующих моменту времени $t = 0$. В качестве недостающих $(n - 1)$ уравнений используют уравнения, полученные путем $(n - 1)$ -кратного дифференцирования уравнения для свободного тока $i''(t)$.

Совместное решение этих уравнений позволяет определить все входящие в выражение свободного тока постоянные интегрирования. Для характеристического уравнения второго порядка, корни которого действительные и неравные, выражение свободного тока

$$i''(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 e^{p_2 t}.$$

Первая производная от свободного тока

$$di''/dt = p_1 A_1 e^{p_1 t} + p_2 A_2 e^{p_2 t}.$$

При $t = 0$ имеем систему уравнений, из которых определяют постоянные интегрирования A_1 и A_2 :

$$i''(0) = A_1 + A_2; \quad \frac{di''}{dt}(0) = p_1 A_1 + p_2 A_2.$$

В полученной системе уравнений $i''(0)$, $\frac{di''}{dt}(0)$ и корни p_1 и p_2 известны, их можно определить для любой электрической цепи, используя законы Кирхгофа и законы коммутации. Совместное решение уравнений позволяет получить значения постоянных интегрирования

$$A_1 = \frac{\frac{di''}{dt}(0) - p_2 i''(0)}{p_1 - p_2}, \quad A_2 = i''(0) - A_1.$$

Если характеристическое уравнение имеет два действительных отрицательных равных корня $p_1 = p_2 = -a$, то решение уравнения приводят к виду

$$i''(t) = A_1 e^{p_1 t} + A_2 t e^{p_2 t} = (A_1 + A_2 t) e^{-at}.$$

Если корни характеристического уравнения комплексные сопряженные $p_1 = -a + jb$ и $p_2 = -a - jb$, то $i''(t) = A e^{-at} \sin(bt - \gamma)$.

Полученное выражение для свободной составляющей

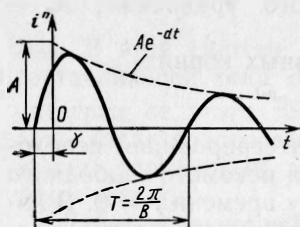


Рис. 6.7

тока переходного процесса рассматриваемой электрической цепи соответствует затухающему гармоническому колебанию (рис. 6.7) с угловой частотой $\omega_0 = b = 2\pi/T$ и начальной фазой, равной γ . Огибающая затухающего колебательного процесса определяется кривой вида Ae^{-at} . Величины A и γ

определяются значениями параметров рассматриваемой цепи, начальными условиями и значением напряжения источника питания.

При этом значения угловой частоты свободных колебаний $\omega_0 = b$ и коэффициент затухания $a = \delta$ зависят только от параметров цепи после коммутации. Их определяют из выражений для корней характеристического уравнения.

Соответственно A и γ находят по значениям $i''(0)$ и $\frac{di''}{dt}(0)$, т. е. из уравнений

$$i''(0) = A \sin \gamma, \quad \frac{di''}{dt}(0) = -A \delta \sin \gamma + A \omega_0 \cos \gamma.$$

Переходные процессы широко используются в электронной и импульсной технике для генерирования синусоидальных электрических колебаний (генераторы типа RC и LC) и получения электрических колебаний специальной формы (генераторы прямоугольных, пилообразных и других колебаний).

Задание по работе

1. Провести экспериментальное исследование переходных процессов в электрических цепях $R-C$, $R-L$ и $R-L-C$ при включении под постоянное напряжение и при их коротком замыкании.
2. По экспериментальным данным определить параметры, характеризующие переходные процессы в исследуемых цепях, и сравнить их с соответствующими параметрами, полученными расчетным путем.
3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой (схема рис. 6.8) и приборами, используемыми при выпол-

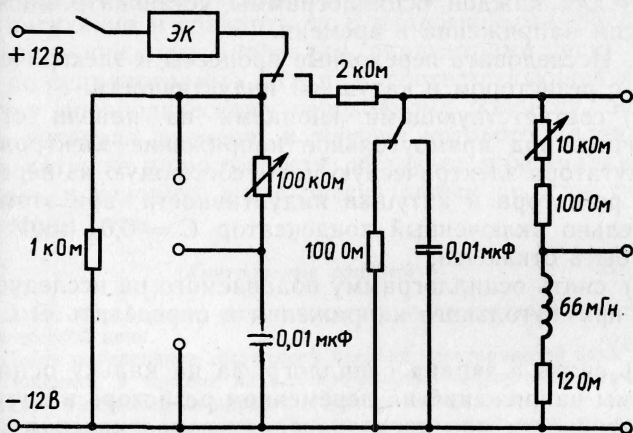


Рис. 6.8

нении работы. Записать в отчет по лабораторной работе параметры исследуемых электрических цепей.

2. Подключить экспериментальную установку для исследования переходных процессов (панель № 7) к стабилизированному источнику постоянного напряжения $U = 12 \text{ В}$ и включить электронный коммутатор.

3. Включить напряжение питания осциллографа С1-72, нажав кнопку «сеть» на передней панели прибора, осуществить его прогрев в течение 3—5 мин.

4. Подать на «Вход Y» осциллографа напряжение с резистора $R = 1 \text{ кОм}$, используя для этого соединительный кабель со штекером.

5. Установить на экране осциллографа полтора-два периода напряжения питания и по полученной временной зависимости $u(t)$ на экране осциллографа определить: а) амплитуду напряжения импульса; б) длительность импульса и паузы; в) частоту коммутации электронного коммутатора.

6. Провести исследование переходных процессов в электрической цепи с резистором и конденсатором:

а) переключить вход осциллографа с резистора $R = 1 \text{ кОм}$ на конденсатор $C = 0,01 \text{ мкФ}$; затем при трех различных значениях сопротивления переменного резистора ($R \approx 20; 60 \text{ и } 100 \text{ кОм}$) снять на кальку осциллограммы напряжений на конденсаторе и на резисторе при переходных процессах. Установить значение сопротивления переменного резистора, используя для этой цели прибор В7-22А:

б) для каждой осциллограммы установить масштаб по осям напряжения и времени.

7. Исследовать переходные процессы в электрической цепи с резистором и катушкой индуктивности:

а) соответствующими кнопками на панели стенда включить под прямоугольное напряжение электронного коммутатора электрическую цепь, состоящую из переменного резистора и катушки индуктивности; при этом параллельно включенный конденсатор $C = 0,01$ мкФ должен быть отключен;

б) снять осциллограмму подаваемого на исследуемую цепь прямоугольного напряжения и определить его амплитуду;

в) снять с экрана осциллографа на кальку осциллограммы напряжений на переменном резисторе и катушке индуктивности при трех значениях сопротивления переменного резистора ($R = 100$ Ом, $R = 5$ кОм и $R = 10$ кОм).

8. Исследовать переходные процессы в электрической цепи с двумя накопителями энергии — конденсатором и катушкой индуктивности:

а) подключить параллельно переменному резистору и катушке индуктивности конденсатор с емкостью $C = 0,01$ мкФ; затем провести три опыта при значениях суммарного сопротивления резисторов $R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}$, $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ и $R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}$; измерение сопротивления резисторов произвести при отключенном напряжении питания исследуемой цепи;

б) при выполнении опытов снять на кальку осциллограммы напряжения на катушке индуктивности при зарядке и разрядке конденсатора.

9. Провести обработку результатов опытов:

а) по осциллограммам $u_C(t)$ опыта п. 6 определить постоянные времени исследуемых RC -цепей при разрядке и зарядке конденсатора и сравнить их с соответствующими значениями, рассчитанными по числовым значениям параметров отдельных элементов цепи;

б) по осциллограммам $u_L(t)$ опыта п. 7 определить постоянные времени исследуемых RL -цепей при переходных процессах и сравнить их с аналогичными расчетными значениями;

в) по осциллограмме $u_L(t)$ п. 8, соответствующей колебательному переходному процессу, определить частоту

собственных колебаний исследуемой цепи и ее коэффициент затухания и сравнить их с аналогичными, рассчитанными по числовым значениям, параметрами цепи;

г) по осциллограмме $u_L(t)$ п. 8, соответствующей предельному апериодическому переходному процессу, определить интервал времени, в течение которого напряжение на катушке индуктивности достигает максимального значения, и сравнить его с рассчитанным по известным параметрам цепи.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение установившегося и переходного процессов в электрической цепи.
2. Дайте определение постоянной времени электрической цепи.
3. Поясните, в течение какого промежутка времени практически заканчивается переходный процесс в электрической цепи.
4. Определите постоянную времени электрической цепи по экспериментальным зависимостям тока и напряжения при переходном процессе.
5. Укажите, от каких параметров зависит постоянная времени неразветвленных R - C - и R - L -цепей.
6. Как определить емкость конденсатора или сопротивление резистора, на который разряжается конденсатор, по кривой его разрядки на экране осциллографа, если одно из них известно?
7. Напишите выражение для переходного напряжения на конденсаторе при включении R - C -цепи под постоянное напряжение.
8. Напишите выражение для переходного тока при включении электрической RC -цепи под постоянное напряжение.
9. Назовите устройства, в которых используются явления, возникающие при переходных процессах в электрических цепях.
10. Дайте определение законов коммутации.

Лабораторная работа 7

Выпрямительные устройства

Ц е л ь р а б о т ы. Исследование одно- и двухполупериодных выпрямительных устройств, сравнение полученных экспериментальных данных с теоретическими, анализ работы сглаживающих фильтров, снятие внешних характеристик.

Основные теоретические положения

Для питания электронной аппаратуры, электродвигателей постоянного тока, электролизных и других установок возникает необходимость в выпрямлении переменного тока в постоянный.

Под выпрямлением понимается процесс преобразова-

ния переменного тока в постоянный с помощью устройств, обладающих односторонней проводимостью (электрических вентилях).

Выпрямительные устройства обычно состоят из трех основных элементов: трансформатора, электрического вентиля* и сглаживающего фильтра. С помощью трансформатора изменяется значение переменного напряжения, получаемого от источника питания, с целью приведения его в соответствие со значением требуемого выпрямленного напряжения.

Выпрямление переменного тока осуществляется электрическим вентиляем. Электрические вентиля по своим вольт-амперным характеристикам делятся на две группы. К *первой* относятся вакуумные электронные и полупроводниковые диоды, вольт-амперные характеристики которых для проводящего направления могут быть приближенно представлены наклонными прямыми, проходящими через начало координат (рис. 7.1, а). Ко *второй* относят

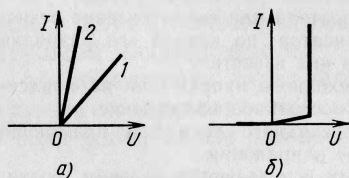


Рис. 7.1

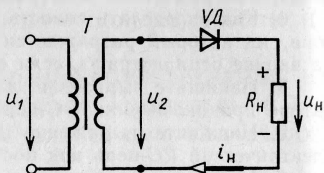


Рис. 7.2

газоразрядные (ионные) приборы, у которых зависимость тока от напряжения для проводящего направления может быть представлена вертикальной прямой (рис. 7.1, б).

Сглаживающие фильтры предназначены для уменьшения пульсации выпрямленного тока и напряжения на выходе выпрямительных устройств.

При выпрямлении переменного тока в зависимости от числа фаз сети, питающей выпрямительное устройство, и характера нагрузки, а также требований, предъявляемых к выпрямленному току и напряжению, электрические вентиля могут быть соединены по различным схемам.

При выпрямлении однофазного переменного тока простейшими схемами выпрямления являются одно- и двухполупериодная одноконтурные однофазные схемы.

* Аппараты, в которых достигается односторонняя проводимость с помощью движущихся частей (коллекторов, вибрирующих контактов и т. д.), электрическими вентилями не называются.

Однотактными выпрямительными устройствами являются такие, в которых ток во вторичной обмотке трансформатора в процессе выпрямления протекает только в одном направлении, в двухтактных выпрямительных устройствах — в обоих направлениях.

Схема однотактного однофазного однополупериодного выпрямления представлена на рис. 7.2. В качестве электрического вентиля в этой схеме используется полупроводниковый диод $VД$.

При подаче переменного синусоидального напряжения на первичную обмотку согласующего трансформатора напряжение на зажимах вторичной его обмотки будет также переменным синусоидальным, т. е.

$$u_2 = U_{2m} \sin \omega t.$$

Диод проводит электрический ток только в том случае, когда его анод относительно катода имеет положительный потенциал. Поэтому ток в цепи (вторичная обмотка трансформатора, диод и нагрузка) протекает только в одном направлении, т. е. в течение одной половины периода переменного напряжения. В результате этого ток в цепи нагрузки оказывается пульсирующим (неизменным по направлению, но изменяющимся по значению). При этом амплитудное значение тока (относительно небольшим сопротивлением диода в прямом направлении можно пренебречь)

$$I_m = U_{2m} / R_n,$$

где R_n — сопротивление потребителя электроэнергии (нагрузки).

Кривая получаемого в процессе однополупериодного выпрямления пульсирующего тока может быть разложена в гармонический ряд Фурье:

$$i = I_m \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t - \frac{2}{3\pi} \cos 2\omega t - \dots \right).$$

Из приведенного выражения следует, что пульсирующий ток при однополупериодном выпрямлении, кроме переменных составляющих различных амплитуд и частот, содержит также и постоянную составляющую $I_d = I_m / \pi$. При этом постоянную составляющую напряжения на нагрузке или среднее значение выпрямленного напряжения U_d с учетом выражения для тока I_m определяют из соотношения

$$U_d = R_n I_d = \frac{I_m}{\pi} R_n = \frac{U_{2m}}{\pi}.$$

Выражая среднее значение выпрямленного напряжения через действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора, имеем

$$U_d = U_{2m}/\pi = \sqrt{2} U_2/\pi = 0,45 U_2.$$

Однополупериодное выпрямление переменного тока характеризуется глубокими пульсациями выпрямленного тока и напряжения (рис. 7.3), которые обуславливаются наличием в кривых выпрямленного тока и напряжения переменных составляющих — пульсаций. Для оценки пульсаций в той или иной схеме выпрямления вводится коэффициент пульсаций — q , под которым понимается отношение амплитуды A_m наиболее выраженной гармонической составляющей, входящей в кривые выпрямленного тока или напряжения, к постоянной составляющей A_d тока или напряжения в выходной цепи выпрямителя: $q = A_m/A_d$.

Для однополупериодного выпрямления с учетом гармонических составляющих тока коэффициент пульсаций

$$q = \frac{1}{2} I_m / \frac{1}{\pi} I_m = \pi/2.$$

В течение половины периода, когда анод диода имеет отрицательный относительно катода потенциал, он тока не проводит, при этом через диод возможен некоторый относительно небольшой обратный ток, влиянием которого во многих случаях можно пренебречь.

Напряжение, воспринимаемое диодом в непроводящий полупериод, — обратное напряжение $u_{обр}(t)$ при этом

определяется значением напряжения $u_2(t)$ на вторичной обмотке трансформатора. Следовательно, максимальное значение обратного напряжения, которое приложено к диоду в данной схеме, равно амплитудному значе-

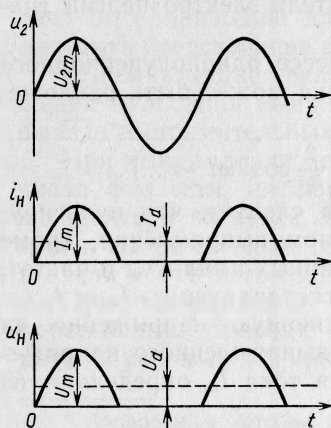


Рис. 7.3

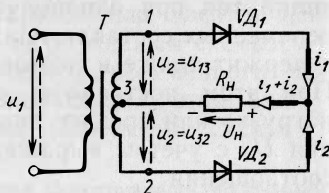


Рис. 7.4

нию напряжения U_{2m} на вторичной обмотке трансформатора, т. е. $U_{обр\ max} = U_{2m}$. Поэтому при выборе диода для схемы однополупериодного однофазного однопериодного выпрямления необходимо принимать во внимание, что максимально допустимое обратное напряжение диода было больше или равно амплитудному значению напряжения на вторичной обмотке трансформатора.

К недостаткам однополупериодной схемы выпрямления следует отнести значительные пульсации выпрямленного тока и напряжения, а также недостаточно высокое использование трансформатора, так как по его вторичной обмотке при этом протекает ток только в течение полупериода. Выпрямители подобного типа применяются главным образом в маломощных установках, когда выпрямленный ток мал, а достаточно удовлетворительное сглаживание пульсаций может быть обеспечено с помощью фильтра.

Схема двухполупериодного однопериодного выпрямителя представлена на рис. 7.4. Рассматриваемый двухполупериодный выпрямитель представляет собой сочетание двух однополупериодных выпрямителей с общей нагрузкой. При этом напряжение u_2 на каждой половине вторичной обмотки трансформатора (1—3 и 3—2) можно рассматривать как два независимых синусоидальных

напряжения, сдвинутых относительно друг друга по фазе на угол 180° . Так как каждый диод проводит ток только в течение той половины периода, когда анод его становится положительным относительно катода, то нетрудно видеть, что при заданном на рис. 7.4 направлении напряжения на вто-

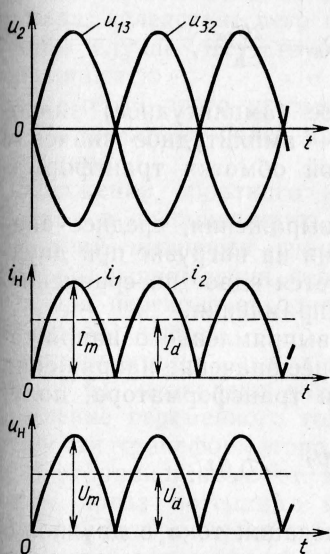


Рис. 7.5

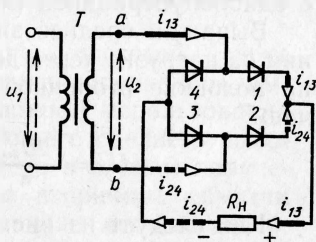


Рис. 7.6

ричной обмотке трансформатора проводить ток будет диод VD_1 . Диод VD_2 при этом будет закрыт. При изменении направления напряжения на вторичной обмотке трансформатора проводящим становится диод VD_2 , а диод VD_1 пропускать ток не будет, так как его анод по отношению к катоду при этом имеет отрицательный потенциал. Таким образом, диоды в схеме будут находиться в проводящем состоянии в различные полупериоды напряжения на обмотках трансформатора. В результате диаграммы выпрямленного тока и напряжения на выходе выпрямительного устройства рис. 7.4 будут иметь вид, представленный на рис. 7.5.

Кривую выпрямленного тока при двухполупериодном выпрямлении можно разложить в гармонический ряд Фурье:

$$i = I_m \left(\frac{2}{\pi} - \frac{4}{3\pi} \cos 2\omega t - \frac{4}{15\pi} \cos 4\omega t - \dots \right).$$

При этом, также как и для схемы однополупериодного выпрямления, наряду с переменными составляющими гармонический ряд содержит и постоянную составляющую тока $I_d = \frac{2}{\pi} I_m$. Постоянная составляющая напряжения на нагрузке (среднее значение выпрямленного напряжения)

$$U_d = I_d R_n = \frac{2I_m}{\pi} R_n = \frac{2U_{2m}}{\pi},$$

где $I_m = U_{2m}/R_n$ — максимальное (амплитудное) значение выпрямленного тока; U_{2m} — амплитудное значение напряжения половины вторичной обмотки трансформатора.

Как видно из полученного выражения, среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке при двухполупериодной схеме увеличивается вдвое по сравнению с однополупериодной схемой выпрямления.

Выражая среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке через действующее значение напряжения на половине вторичной обмотки трансформатора, получаем

$$U_d = \frac{2U_{2m}}{\pi} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi} U_2 = 0,9U_2.$$

Как следует из рис. 7.5, пульсации тока в двухполупериодной схеме значительно уменьшаются по сравнению

со схемой однополупериодного выпрямления. Коэффициент пульсации в данном случае

$$q = \frac{\frac{4}{3\pi} I_m}{\frac{2}{\pi} I_m} = 0,667.$$

Максимальное значение обратного напряжения на диодах в рассматриваемой схеме

$$U_{\text{обр max}} = 2U_{2m}.$$

Действительно, когда один из диодов пропускает ток, потенциал его катода оказывается практически равным потенциалу анода, так как незначительным падением напряжения на диоде при этом можно пренебречь. Тот же потенциал имеет и катод второго диода, в данную часть периода пропускающего ток, так как катоды обоих диодов в схеме связаны. В результате разность потенциалов катода и анода пропускающего диода равна разности потенциалов выводов 1 и 2 вторичной обмотки трансформатора, т. е. $u_{13} + u_{32} = 2u_2$ (см. рис. 7.5).

В сравнении со схемой однополупериодного выпрямителя в двухполупериодном ток во вторичной обмотке трансформатора не содержит постоянной составляющей, так как в этой обмотке ток протекает в течение всего периода, вследствие чего подмагничивание сердечника в данном случае отсутствует, тепловые потери при этом уменьшаются.

С учетом этого применение двухполупериодной схемы выпрямления более предпочтительно, чем однополупериодной.

Снижения обратного напряжения, воздействующего на диод в непроводящую часть периода, и уменьшения расчетной мощности трансформатора при двухполупериодном выпрямлении переменного тока можно достигнуть при переходе от однотактной схемы к двухтактной (мостовой) схеме.

Выпрямитель, выполненный по мостовой схеме (рис. 7.6), позволяет получить двухполупериодное выпрямление переменного тока при полном использовании мощности трансформатора, не имеющего среднего вывода от вторичной обмотки. В этой схеме в течение полупериода, когда потенциал вывода *a* вторичной обмотки трансформатора будет выше потенциала его вывода *b*, ток пропускают диоды 1 и 3. При этом диоды 2 и 4 нахо-

дятся в непроводящем состоянии. В следующий полупериод будут проводить ток соответственно диоды 2 и 4 (цепь тока указана пунктирными стрелками на рис. 7.6), а диоды 1 и 3 будут находиться в непроводящем состоянии. Из схемы видно, что направление тока в цепи нагрузки в течение обоих полупериодов переменного напряжения при этом не меняется.

Таким образом, рассматриваемая схема является схемой двухполупериодного выпрямления. Значения среднего выпрямленного напряжения на нагрузке и коэффициента пульсации для выпрямителя (см. рис. 7.6) определяются так же, как и для однотактного двухполупериодного выпрямителя.

Данная схема выпрямления позволяет получить заданное выпрямленное напряжение при числе витков вторичной обмотки трансформатора, вдвое меньшем, чем в однотактной двухполупериодной схеме выпрямления (см. рис. 7.4) при прочих равных условиях.

Так как во вторичной обмотке трансформатора в рассматриваемой схеме протекает не пульсирующий, а синусоидальный переменный ток, это позволяет уменьшить габариты трансформатора по сравнению с трансформатором, необходимым для питания однотактного двухполупериодного выпрямителя, рассчитанного на ту же мощность, приблизительно в 1,5 раза.

Значение максимального обратного напряжения при одинаковом выпрямленном напряжении U_d для мостовой схемы (см. рис. 7.6) также оказывается в два раза меньше, чем для однотактной двухполупериодной схемы выпрямления (см. рис. 7.4).

Мостовые схемы позволяют осуществлять выпрямление переменного тока в постоянный без использования согласующего трансформатора при непосредственном подведении сетевого переменного напряжения к вентильному мосту, когда напряжение питающей сети находится в соответствии с выпрямляемым напряжением.

Рассмотренные схемы выпрямления имеют относительно большие значения коэффициента пульсаций. Между тем для питания большей части электронной аппаратуры требуется выпрямленное напряжение с коэффициентом пульсации, не превышающим значений $\gamma = 0,002 \div 0,02$.

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения можно значительно снизить, если на выходе выпрямителя включить сглаживающий электрический фильтр. Прос-

тейшими сглаживающими фильтрами являются конденсатор, включаемый параллельно слаботочной нагрузке (рис. 7.7), и дроссель, включаемый последовательно с сильноточной нагрузкой (рис. 7.8).

Другие фильтры (комбинированные), представляющие собой сочетания из емкостных и индуктивных эле-

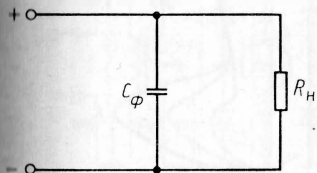


Рис. 7.7

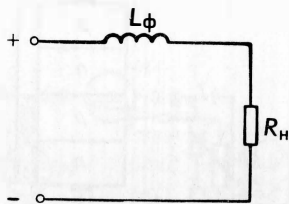


Рис. 7.8

ментов, позволяют получить достаточно малые значения коэффициента пульсации.

При использовании простейшего емкостного фильтра сглаживание пульсаций выпрямленного напряжения и тока происходит за счет периодической зарядки конденсатора фильтра C_ϕ (когда напряжение на выходе трансформатора превышает напряжение на нагрузке) и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки.

Конденсатор, как известно, не пропускает постоянной составляющей тока и обладает тем меньшим сопротивлением для переменных составляющих, чем выше их частота. Емкостные фильтры применяются предпочтительно в схемах выпрямления с малыми значениями выпрямленного тока, так как при этом возрастает эффективность сглаживания.

Простейший индуктивный сглаживающий фильтр состоит из индуктивной катушки — дросселя, включаемого последовательно с нагрузкой. В результате пульсаций выпрямленного тока в катушке индуктивности возникает электродвижущая сила самоиндукции $e_L = \pm L \frac{di}{dt}$, которая в силу закона электромагнитной индукции стремится сгладить пульсации тока в цепи нагрузки, а следовательно, и пульсации напряжения на ее зажимах. Индуктивные фильтры обычно применяют в схемах выпрямления с большими значениями выпрямленного тока, так как в этом случае увеличивается эффективность сглаживания.

В тех случаях, когда необходимо применение выпрямительного устройства с регулируемым значением вы-

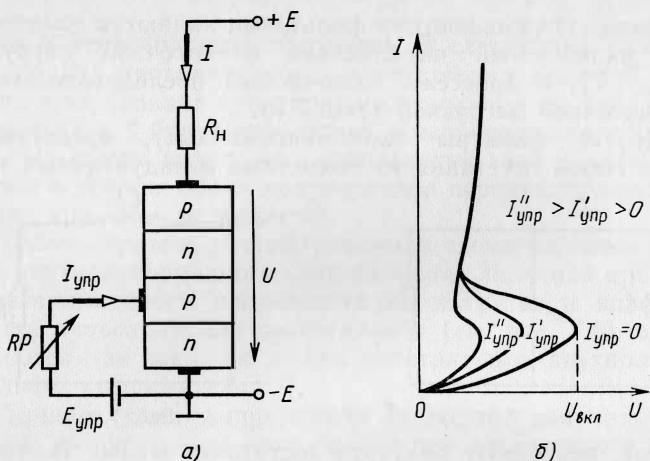


Рис. 7.9

прямленного напряжения, используют управляемые выпрямители с тиристорами, являющимися управляемыми полупроводниковыми приборами, имеющими три p - n -перехода (рис. 7.9, а, б). Под действием прямого приложенного напряжения два крайних из них открыты, а средний — закрыт. Под действием управляющего тока средний p - n -переход открывается и тиристор в прямом направлении проводит электрический ток как обычный полупроводниковый диод. При смене полярности приложенного к тиристору напряжения первоначальное (закрытое) состояние среднего p - n -перехода восстанавливается и протекание тока в цепи тиристора прекращается. Изменяя управляющий ток, можно менять момент открывания тиристора во времени, а следовательно, изменять выпрямленный ток и напряжение на нагрузке.

Задание по работе

1. Ознакомиться со схемой рис. 7.10 лабораторной установки для исследования полупроводникового выпрямительного устройства.
2. Исследовать однополупериодный выпрямитель.
3. Исследовать одноконтный двухполупериодный выпрямитель.
4. Исследовать двухконтный двухполупериодный (мостовой) выпрямитель.
5. Составить краткие выводы по работе.

1. Ознакомиться с экспериментальной установкой (рис. 7.10) для исследования однополупериодной, двухполупериодной одноконтурной и двухполупериодной двух-

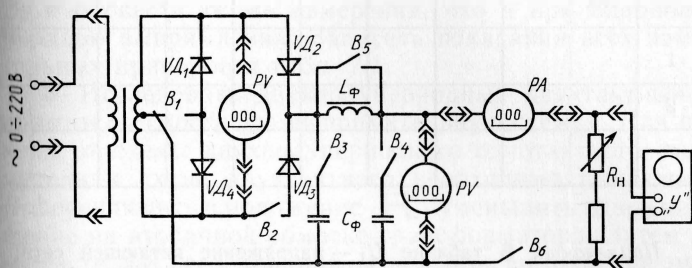


Рис. 7.10

тактной (мостовой) выпрямительных схем на полупроводниковых диодах, а также с необходимыми для выполнения работы измерительными приборами и оборудованием.

2. Подготовить установку к проведению исследований:

а) подключить цифровой амперметр для измерения выпрямленного тока нагрузки;

б) подключить цифровой вольтметр для измерения выпрямленного напряжения на нагрузке;

в) подключить осциллограф для наблюдения и регистрации формы выпрямленного напряжения на нагрузке;

г) подключить источник регулируемого переменного напряжения, с помощью которого установить напряжение на входе выпрямительного устройства $U_1 = 220$ В и при проведении опытов поддерживать его неизменным.

3. Исследовать выпрямитель, собранный по однополупериодной схеме (см. рис. 7.2) при работе без сглаживающих фильтров. При этом выключатели B_3 и B_4 в цепях конденсаторов разомкнуты, выключатель B_5 в шунтирующей цепи дросселя и выключатель B_6 в цепи нагрузки — замкнуты, выключатель B_1 в положении ⌋ , выключатель B_2 — разомкнут:

а) включить напряжение питания установки и измерительных приборов — цифровых амперметра, вольтметра и осциллографа;

б) установить на экране осциллографа размер осцил-

Таблица 7.1

Номера измерений	Измерения					Вычисления				
	Тип фильтра	U_1 , В	$2U_2$, В	U_d , В	I_d , мА	R_n , Ом	U_{2m} , В	q —	U_{dp} , В	I_{dp} , мА
1										
2										
...										

Примечание. В таблице U_1 — напряжение питающей сети; U_2 , U_{2m} — половина действующего напряжения на вторичной обмотке согласующего трансформатора и его амплитудное значение; U_d , I_d — измеренные выпрямленные значения напряжения и тока нагрузки; U_{dp} , I_{dp} — расчетные выпрямленные значения напряжения и тока нагрузки; R_n — сопротивление нагрузочных резисторов; q — коэффициент пульсаций напряжения и тока нагрузки.

лограммы по вертикали — 30—40 мм; зарисовать на кальке в масштабе осциллограмму и записать показания всех измерительных приборов в табл. 7.1.

Осциллограммы всех последующих опытов должны быть зарисованы в принятом масштабе при неизменной частоте генератора развертки осциллографа.

4. Провести исследования, аналогичные п. 3, снимая осциллограмму с экрана осциллографа и записывая показания всех измерительных приборов в табл. 7.1, при включении в схему выпрямителя:

а) индуктивного (дроссельного) сглаживающего фильтра;

б) емкостного сглаживающего фильтра (дроссель закорочен);

в) индуктивно-емкостного ($L - C$ -типа) Г-образного сглаживающего фильтра;

г) индуктивно-емкостного ($C - L - C$ -типа) П-образного сглаживающего фильтра.

5. Снять внешнюю характеристику $U_d(I_d)$ однополупериодного выпрямителя при $U_1 = \text{const}$ и отсутствии сглаживающего фильтра, регистрируя выпрямленные напряжение и ток при изменении сопротивления нагрузки. Результаты измерений нанести на график.

6. Включить в выпрямительную схему емкостный

фильтр и снять внешнюю характеристику в этих условиях. Первую точку характеристики снять для режима холостого хода (выключатель B_6 — разомкнут).

7. Исследовать двухполупериодный одноктактный выпрямитель: в предыдущей схеме замкнуть выключатель B_2 и провести те же измерения, что и при однополупериодном выпрямлении. Записать показания всех измерительных приборов в табл. 7.1.

8. Исследовать двухполупериодный двухтактный выпрямитель (мостовую выпрямительную схему). Для перехода от схемы двухполупериодного одноктактного выпрямителя к схеме двухтактного необходимо выключатель B_1 переключить в положение II , уменьшить вдвое напряжение на вторичной обмотке трансформатора. Затем провести те же исследования, что и при выполнении опыта по п. 3 и 4.

9. Провести обработку результатов измерений:

а) для выпрямительных схем одно- и двухполупериодной одно- и двухтактной без сглаживающих фильтров рассчитать значение коэффициента пульсаций, используя измеренные значения напряжений U_2 и U_d ;

б) для этих же схем по измеренному значению напряжения на вторичной обмотке трансформатора определить расчетные значения выпрямленного тока и напряжения на нагрузке U_{dp} и I_{dp} и сравнить их значения с опытными значениями U_d и I_d .

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение выпрямительных устройств.
2. Укажите, какие требования предъявляются к диодам, используемым в выпрямительных устройствах?
3. Назовите основные типы однофазных выпрямительных схем.
4. Объясните отличие одноктактной схемы выпрямления от двухтактной схемы.
5. Поясните принцип действия одно- и двухполупериодной схем выпрямления.
6. Изобразите временные диаграммы напряжений и токов нагрузки одно- и двухполупериодной схем выпрямления без сглаживающего фильтра.
7. Назовите основные виды сглаживающих фильтров.
8. Поясните, в каких случаях целесообразно использовать индуктивные, а в каких — емкостные фильтры или их сочетания.
9. Каково значение коэффициента пульсаций напряжения или тока исследуемых выпрямительных схем?
10. Поясните назначение согласующего трансформатора в выпрямительных схемах.

Лабораторная работа 8

Транзисторы и применение их в усилителях

Цель работы. Исследование статических входных и выходных характеристик транзистора и определение по ним характеристических h -параметров. Применение транзистора в схеме однокаскадного усилителя напряжения, исследование влияния параметров элементов схемы усилительного каскада, выполненного на транзисторе по схеме с общим эмиттером, на его основные характеристики.

Основные теоретические положения

Транзистор (полупроводниковый триод) представляет собой электронный прибор, основанный на взаимодействии двух расположенных близко друг от друга (на расстоянии нескольких микрон) электронно-дырочных p - n -переходов.

Основным элементом транзистора является кристалл германия или кремния, в котором с помощью соответ-

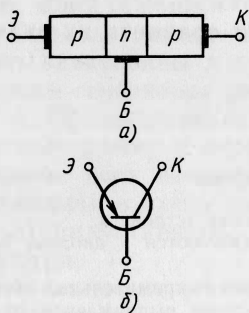


Рис. 8.1

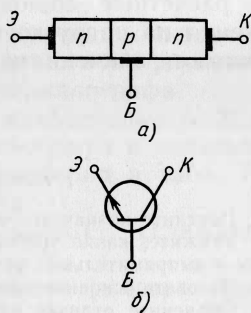


Рис. 8.2

ствующим примесям созданы три области (слоя) с различными типами проводимости. В германиевом транзисторе (рис. 8.1, а) обычно два крайних слоя обладают дырочной проводимостью (p -области), а внутренний слой имеет электронную проводимость (n -область), в соответствии с чем такой транзистор называется полупроводниковым триодом типа p - n - p . Условное обозначение транзистора типа p - n - p показано на рис. 8.1, б. Кремние-

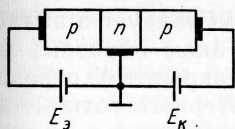


Рис. 8.3

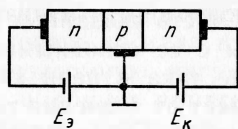


Рис. 8.4

вые транзисторы чаще изготавливают в виде полупроводниковых триодов типа $n-p-n$, принципиальная схема и условное изображение которых показаны на рис. 8.2, а, б. Следует заметить, что принцип действия полупроводниковых транзисторов независимо от их типа один и тот же. Различие состоит лишь в выборе полярности присоединяемых к ним источников питания. Средняя область (слой) транзистора независимо от типа является его базой B или основанием, а крайние — эмиттером \mathcal{E} и коллектором K .

Наличие трех слоев с различной проводимостью обуславливает на границах их раздела два $p-n$ -перехода, характеризующихся динамическим равновесием. Чтобы вывести $p-n$ -переход из состояния равновесия, к нему прикладывается внешнее напряжение.

Схемы включения источников питания транзисторов типов $p-n-p$ и $n-p-n$ показаны на рис. 8.3 и 8.4.

Транзисторы включают в схему таким образом, чтобы к переходу эмиттер — база внешнее напряжение было приложено в прямом направлении, а к $p-n$ -переходу коллектор — база — в обратном направлении.

При воздействии внешних напряжений потенциальный барьер между эмиттером и базой понижается, а между базой и коллектором — увеличивается. В результате основные носители заряда эмиттерного слоя переходят в область базы, а затем в область коллектора, создавая ток коллекторного перехода.

Одновременно с этим происходит и переход основных носителей заряда базы через эмиттерный переход. Однако в область базы при изготовлении транзистора вводят значительно меньшее количество атомов примеси, чем в эмиттер, поэтому ток эмиттерного перехода создается главным образом переходом основных носителей эмиттерного слоя. Если время прохождения основных носителей заряда эмиттера через область базы много меньше времени их независимого существования, то основная часть этих носителей доходит до коллекторного перехода и попадает в область коллектора. При этом лишь неболь-

шая часть указанных носителей рекомбинирует в области базы с ее основными носителями. Таким образом, значение тока в цепи коллекторного (закрытого) перехода зависит от значения тока в цепи эмиттерного (открытого) перехода. Связь между токами коллекторной и эмиттерной цепей характеризуется коэффициентом передачи тока

$$\alpha = (\Delta I_K / \Delta I_E) \Big|_{U_K = \text{const}},$$

где ΔI_K , ΔI_E — приращения коллекторного и эмиттерного токов.

Коэффициент передачи тока транзистора можно выразить через мгновенные значения переменных составляющих токов коллекторной и эмиттерной цепей:

$$\alpha = i_K / i_E,$$

где i_K , i_E — токи в цепях коллектора и эмиттера.

Для плоскостных транзисторов коэффициент передачи тока $\alpha = 0,92 \div 0,99$. Это означает, что в области базы рекомбинирует соответственно 1—8 % основных носителей заряда эмиттера. Число рекомбинирующих в области базы основных носителей заряда эмиттера определяет ток базы i_B . В соответствии с этим $i_E = i_K + i_B$.

При рассмотрении усилительных свойств транзисторов схемы включения их для усиления переменных сигналов можно рассматривать без источников питания, так как по сравнению с другими сопротивлениями схемы сопротивления источников питания оказываются весьма незначительными (рис. 8.5—8.7).

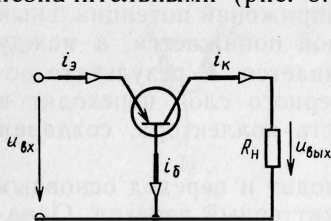


Рис. 8.5

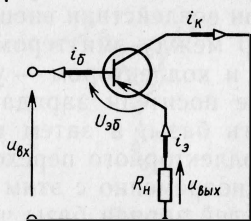


Рис. 8.6

Схему усилительной ячейки на транзисторе с *общей базой* (рис. 8.5) можно применять на более высоких частотах, однако она имеет коэффициент усиления по току меньше единицы и малое входное сопротивление. Схема включения транзистора с *общим коллектором* (рис. 8.6) имеет большое входное и малое выходное со-

противления. Поэтому ее часто применяют в многокаскадных усилителях в качестве согласующего каскада и выходного каскада при работе на низкоомную нагрузку. Наиболее часто используют схему с *общим эмиттером* (рис. 8.7), с помощью которой можно осуществлять усиление по току, напряжению и наибольшее по сравнению с другими схемами включения транзистора усиление по мощности. Эта схема характеризуется незначительным входным сопротивлением.

Рассматривая основные усилительные схемы на транзисторах, исходят из предположений, что работа транзистора происходит на линейных участках его характеристик, что соответствует малым входным сигналам, и что при расчете коэффициентов усиления транзисторно-резисторных усилительных схем при работе на средних частотах влиянием входных, переходных и выходных емкостей пренебрегают.

Коэффициент усиления усилительного каскада по току независимо от схемы включения транзистора

$$K_i = i_{\text{вых}}/i_{\text{вх}},$$

где $i_{\text{вых}}$, $i_{\text{вх}}$ — мгновенные значения выходного и входного токов.

В общем случае коэффициент усиления по напряжению

$$K_u = u_{\text{вых}}/u_{\text{вх}},$$

где $u_{\text{вых}}$, $u_{\text{вх}}$ — мгновенные значения выходного и входного напряжений.

Коэффициент усиления по мощности определяют как произведение соответствующих коэффициентов усиления по току и напряжению:

$$K_p = K_i K_u.$$

В общем случае входное сопротивление каскада независимо от схемы включения транзистора определяют как отношение мгновенного значения входного напряжения к мгновенному значению входного тока:

$$R_{\text{вх}} = u_{\text{вх}}/i_{\text{вх}}.$$

В соответствии с условными положительными направлениями напряжений нетрудно установить, что сигналы на входе и на выходе схемы с общей базой (см. рис. 8.5) и схемы с общим коллектором (см. рис. 8.6) совпадают по фазе. Для схемы с общим эмиттером (см.

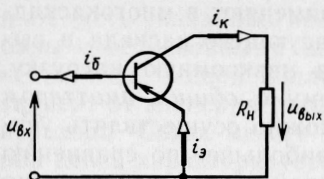


Рис. 8.7

рис. 8.7) входное и выходное напряжения оказываются в противофазе.

Далее приведены выражения для коэффициентов усиления соответствующих наиболее распространенной на практике схеме включе-

ния транзистора с общим эмиттером.

Выражение для коэффициента усиления по току для этой схемы имеет вид

$$K_{i\varepsilon} = \alpha / (1 - \alpha).$$

Коэффициент передачи тока в данной схеме $\alpha = 0,9 \div 0,98$, поэтому коэффициент усиления по току в схеме с общим эмиттером в отличие от схемы с общей базой, для которой $K_{iб} = \alpha < 1$, оказывается больше единицы и, следовательно, она может быть использована для усиления тока.

Выражение для коэффициента усиления по напряжению для схемы с общим эмиттером определяется соотношением

$$K_{u\varepsilon} = u_{вых} / u_{вх} = i_к R_H / i_б R_{вх\varepsilon} = K_{i\varepsilon} \frac{R_H}{R_{вх\varepsilon}},$$

где R_H — сопротивление нагрузочного резистора.

В этой схеме входное сопротивление

$$R_{вх\varepsilon} = u_{вх} / i_{вх} = u_{э} / i_б.$$

Принимая во внимание, что ток эмиттера равен сумме тока базы и тока коллектора $i_э = i_б + i_к$, ток базы с учетом выражения для коэффициента передачи тока эмиттера можно определить через ток эмиттера

$$i_б = i_э (1 - \alpha).$$

Входное сопротивление

$$R_{вх\varepsilon} = \frac{u_{э}}{i_э(1-\alpha)} = \frac{R_{эб}}{1-\alpha}.$$

Коэффициент усиления по напряжению в схеме с общим эмиттером:

$$K_{u\varepsilon} = \alpha \frac{R_H}{R_{эб}},$$

где $R_{эб}$ — сопротивление открытого перехода транзистора.

Это сопротивление обычно много меньше нагрузочного сопротивления, поэтому коэффициент усиления по напряжению оказывается больше единицы и схема с общим эмиттером может быть использована и для усиления напряжения.

Коэффициент усиления по мощности для схемы с общим эмиттером с учетом полученных выражений

$$K_{pэ} = K_{iэ} K_{uэ} = \frac{\alpha^2}{(1-\alpha)} \frac{R_n}{R_{эб}}.$$

Анализ данного выражения показывает, что схема с общим эмиттером может быть использована и для усиления мощности.

Аналогично можно получить выражения для коэффициентов усиления по току, напряжению и мощности для схем включения транзистора с общей базой и с общим коллектором.

Основными характеристиками транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером, являются статическая входная характеристика $I_б(U_б)$ при $U_к = \text{const}$ (рис. 8.8) и статическая выходная $I_к(U_к)$ при $I_б = \text{const}$ (рис. 8.9).

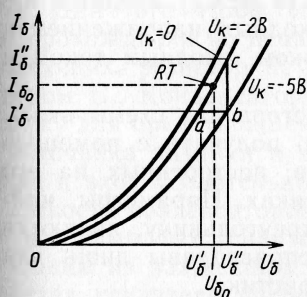


Рис. 8.8

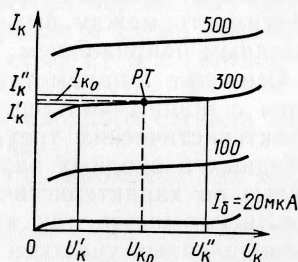


Рис. 8.9

Входная характеристика определяет зависимость тока базы от напряжения на базе при неизменном напряжении на коллекторе. В рассматриваемой схеме к эмиттерному переходу транзистора приложено прямое напряжение, поэтому при напряжении на коллекторе $U_к = 0$ входная характеристика соответствует прямой ветви вольт-амперной характеристики полупроводникового $p-n$ -перехода. При этом увеличение отрицательного напряжения на кол-

лекторе смещает характеристику вправо, что соответствует уменьшению тока базы. Это объясняется тем, что чем больше отрицательное напряжение на коллекторе, тем меньше ширина слоя базы. Уменьшение же ширины приводит к уменьшению рекомбинаций в ней, а следовательно, и к уменьшению тока базы.

Статическая выходная характеристика транзистора показывает зависимость тока коллектора от напряжения на коллекторе при неизменном значении тока базы. Так как к коллекторному переходу приложено обратное напряжение, выходная характеристика соответствует левой ветви вольт-амперной характеристики p - n -перехода. С увеличением тока базы концентрация неосновных носителей заряда базы возрастет за счет инжекции их из эмиттера. При этом через коллекторный переход будет проходить большее количество основных носителей заряда из эмиттера, что приведет к увеличению тока коллектора.

Свойства транзисторов в рабочем (динамическом) режиме оцениваются по их характеристическим параметрам, которые устанавливают связь между малыми изменениями токов и напряжений. В настоящее время наиболее распространена система h -параметров, выражающая функциональную зависимость между входным напряжением, входным током и выходным напряжением и зависимость между выходным током, входным током и выходным напряжением.

Основные h -параметры транзистора для схемы включения с общим эмиттером можно получить с помощью характеристических треугольников, построенных на его выходных и входных характеристиках. Параметры, найденные по характеристическому треугольнику, являются малосигнальными, так как они справедливы лишь для прямолинейных участков характеристик.

Из характеристического треугольника, построенного на семействе статических входных характеристик транзистора в области рабочей точки PT , можно определить входное сопротивление триода — h_{11} и коэффициент обратной связи — h_{12} :

$$h_{11} = \left. \frac{\Delta U_6}{\Delta I_6} \right|_{U_k = \text{const}} \quad \text{и} \quad h_{12} = \left. \frac{\Delta U_6}{\Delta U_k} \right|_{I_6 = \text{const}}.$$

Из семейства статических выходных характеристик определяют коэффициент усиления по току h_{21} и выход-

ную проводимость h_{22} :

$$h_{21} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta I_6} \right|_{U_k = \text{const}} \quad \text{и} \quad h_{22} = \left. \frac{\Delta I_k}{\Delta U_k} \right|_{I_6 = \text{const}}.$$

В усилительной схеме из всех способов включения транзистора в основном используют схему с общим эмиттером, так как она позволяет усиливать не только напряжение, но также ток и мощность.

Типовая схема усилительного каскада с общим эмиттером показана на рис. 8.10. Наличие резисторов R_1 , R_2 и R_k в схеме обеспечивает необходимые значения постоянных напряжений на коллекторном и эмиттерном переходах при питании всех цепей транзистора от одного общего источника питания E_k . Резистор R_3 предназначен для обеспечения температурной стабилизации рабочей точки, что для транзисторных усилительных схем весьма существенно.

С ростом температуры постоянная составляющая тока эмиттера I_{30} начинает расти. В результате увеличения падения напряжения $I_{30}R_3$ на резисторе R_3 потенциал эмиттера относительно базы снижается, что приводит к уменьшению постоянной составляющей тока базы и к ограничению степени нарастания тока покоя в цепи коллектора. Для того чтобы устранить подобное воздействие при прохождении по цепям транзистора переменных составляющих, резистор R_3 зашунтирован в схеме конденсатором C_3 . Конденсаторы с емкостью C_1 и C_c введены в схему для предотвращения попадания постоянного тока от источника питания и источника входного сигнала на выход и вход усилительного каскада.

Емкости конденсаторов C_1 , C_c и C_3 выбирают так же, как и в ламповых усилителях.

Одним из важнейших показателей, характеризующих свойства усилителя, является его комплексный коэффициент усиления, который в общем случае можно представить как отношение комплексного напряжения на выходе усилителя к комплексному напряжению на его входе:

$$\underline{K} = \frac{\dot{U}_{\text{вых}}}{\dot{U}_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}} e^{j\psi_{\text{вых}}}}{U_{\text{вх}} e^{j\psi_{\text{вх}}}} = K e^{j(\psi_{\text{вых}} - \psi_{\text{вх}})} = K e^{j\psi},$$

где $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$ — модуль коэффициента усиления усилителя; $\psi = \psi_{\text{вых}} - \psi_{\text{вх}}$ — разность начальных фазовых углов сигнала, проходящего через усилитель.

Так как любой усилитель всегда содержит комбина-

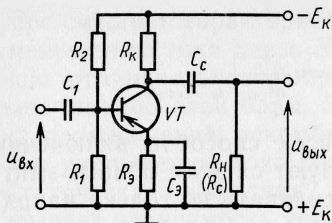


Рис. 8.10

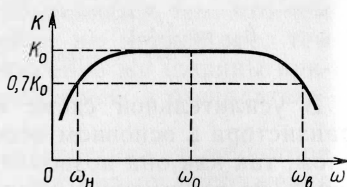


Рис. 8.11

ции активных и реактивных элементов; то модуль коэффициента усиления и разность фазовых углов на выходе и входе усилителя являются частотно-зависимыми.

Зависимость комплексного коэффициента усиления усилителя от частоты, т. е. $K(\omega)$, носит название частотно-фазовой характеристики усилителя.

Обычно зависимости модуля коэффициента усиления и фазового угла от частоты рассматриваются отдельно.

Зависимость модуля коэффициента усиления от частоты получила название амплитудно-частотной характеристики усилителя.

Частотная характеристика усилительного каскада представлена на рис. 8.11. Как видно из рисунка, при изменении частоты усиливаемых колебаний значение модуля коэффициента усилителя K не остается постоянным.

Диапазон частот, в пределах которого изменения коэффициента усиления не превышают заданного значения, называется полосой пропускания или рабочим диапазоном частот усилителя.

Полоса пропускания ограничивается нижней ω_H и верхней ω_b граничными частотами, при которых коэффициент усиления отличается от наибольшего на заданную величину. В радиоэлектронике принято считать, что граничная частота соответствует уменьшению коэффициента усиления по сравнению с наибольшим его значением до уровня $K_0/\sqrt{2} \approx 0,7 K_0$ по напряжению или току и до уровня $0,5 K_0$ по мощности.

Частотную характеристику можно рассматривать как совокупность трех областей. Области частотной характеристики в диапазоне частот от 0 до ω_H и от ω_b до ∞ характеризуются значительным изменением коэффициента усиления при изменении частоты входного сигнала. Область частотной характеристики в диапазоне частот от ω_H до ω_b (полоса пропускания) характеризуется незна-

чительным изменением коэффициента усиления от частоты.

Особенность работы усилителя в областях низких, средних и высоких частот частотной характеристики может быть установлена в процессе анализа частотной характеристики полупроводникового усилителя с использованием схемы замещения (см. рис. 8.12, а) усилительного каскада с общим эмиттером (см. рис. 8.10). Транзистор при определенных допущениях можно рассматривать как линейный активный четырехполосник, для которого справедливы зависимости:

$$u_6 = h_{11}i_6 + h_{12}u_k, \quad i_k = h_{21}i_6 + h_{22}u_k.$$

Учитывая, что безразмерный параметр h_{12} для транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером (см. рис. 8.7), незначителен, на практике его принимают равным нулю. В соответствии с приведенными ранее уравнениями схема замещения данного транзистора приводится к виду рис. 8.12, б, а h -параметры определяются по семейству входных и выходных характеристик. При этом коэффициенты усиления по напряжению, току и мощности определяются через h -параметры транзистора и параметры элементов цепи:

$$K_u = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{i_{\text{вых}} R_{\text{вых}}}{i_{\text{вх}} R_{\text{вх}}} = \frac{i_k R_k}{(1 + h_{22} R_k) i_6 h_{11}} = \frac{h_{21} R_k}{h_{11} (1 + h_{22} R_k)},$$

где

$$i_k = i_{\text{вых}}; i_6 = i_{\text{вх}}; R_{\text{вх}} = h_{11}; R_{\text{вых}} = R_k / (1 + h_{22} R_k).$$

$$K_i = i_{\text{вых}} / i_{\text{вх}} = i_k / i_6 = h_{21} \quad \text{и} \quad K_p = k_u k_i = h_{21}^2 R_k / [h_{11} (1 + h_{22} R_k)].$$

Схема замещения усилительного каскада на транзисторе (рис. 8.10) приведена на рис. 8.12, а. Она составлена на основе схемы замещения транзистора с введением в нее параметров резистивных элементов $R'_1 = R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$, R_n и емкостных элементов C_1 , C_c , $C_0 = C_{\text{вых}} + C_m$, где $C_{\text{вых}}$ — емкость участка транзистора коллектор — эмиттер; C_m — монтажная емкость электрической цепи. При этом коэффициент усиления по напряжению каскада

$$K = K_0 / \sqrt{1 + (\omega \tau_b - 1 / \omega \tau_n)^2},$$

где K_0 — наибольший коэффициент усиления по напряжению каскада на средних частотах, в рассматриваемом случае при допущении $R'_1 \gg h_{11}$ равен $K_0 = h_{21} R_k R_n /$

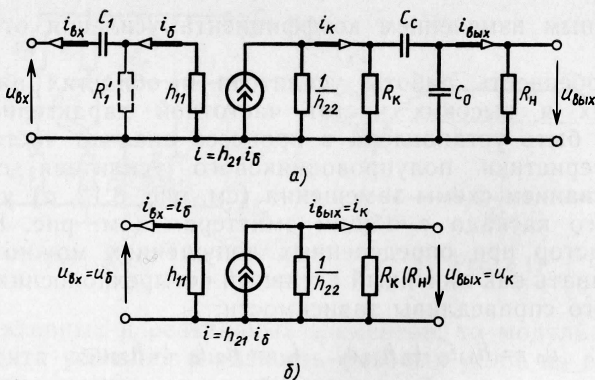


Рис. 8.12

$/(R_k + R_n + h_{22}R_nR_k)$; τ_b — постоянная времени усилительного каскада на верхних частотах ($\tau_b = C_0R_{вых} = C_0R_kR_n/(R_k + R_n + h_{22}R_kR_n)$); τ_n — постоянная времени усилительного каскада на нижних частотах без учета влияния емкости C_1 ($\tau_n = C_cR_{вых} = C_cR_kR_n/(R_k + R_n + h_{22}R_kR_n)$).

При анализе частотной характеристики усилительного каскада в области средних частот $\omega_n < \omega < \omega_b$ в эквивалентной схеме можно не учитывать внешние C_1 и C_c и внутренние C_k емкости каскада, а следовательно, можно рассматривать эквивалентную схему усилительного каскада как частотно-независимую.

В области низких частот $\omega < \omega_n$ наличие спада частотной характеристики можно объяснить изменением реактивных сопротивлений внешних емкостей, обусловленных наличием конденсаторов C_1 и C_c , реактивные сопротивления которых с уменьшением частоты возрастают. Как результат этого, уменьшаются входной и выходной токи в цепи нагрузочного резистора, а следовательно, напряжение на выходе.

Спад частотной характеристики в области высоких частот $\omega > \omega_b$ можно объяснить наличием в эквивалентной схеме суммарной емкости C_0 , равной емкости коллектор — эмиттер, и монтажной емкости C_m , шунтирующей активное сопротивление коллекторного перехода.

Зависимость коэффициентов усиления тока и напряжения от частоты в точном аналитическом выражении описывается гиперболическими функциями комплексного аргумента.

Для получения широкополосной частотной характеристики усилителя в его схему вводятся цепи коррекции по низкой и высокой частотам или цепи обратной связи.

Задание по работе

1. Снять семейство статических входных и выходных характеристик транзистора типа $p-n-p$, включенного по схеме с общим эмиттером, и определить по ним характеристические h -параметры.

2. Исследовать влияние параметров элементов усилительного каскада, выполненного на транзисторе по схеме с общим эмиттером, на его амплитудно-частотную характеристику.

3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с установкой для снятия статических характеристик транзистора, включенного по схеме с общим эмиттером. Записать тип и паспортные данные исследуемого транзистора, а также технические данные используемых в работе измерительных приборов.

2. Снять входную статическую характеристику транзистора $I_b(U_b)$ при $U_{кэ} = \text{const}$:

а) подвести к схеме напряжение $U = 12$ В от стабилизированного источника постоянного напряжения (рис. 8.13);

б) потенциометром R_4 установить на коллекторе транзистора напряжение $U_{кэ} = U_k = 0$ и в процессе снятия характеристики поддерживать его неизменным;

в) изменяя потенциометром R_2 напряжение в цепи базы $U_{бэ} = U_b$ от нуля, установить ток в цепи базы равным значению, указанному в паспортных данных тран-

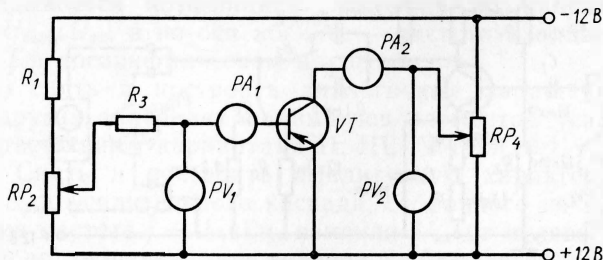


Рис. 8.13

зистора. Затем, уменьшая напряжение на базе транзистора, произвести пять измерений тока базы I_6 и соответствующего ему напряжения U_6 . Результаты измерений нанести на график $I_6(U_6)$ при $U_k = \text{const}$;

г) повторить опыт при другом, заданном преподавателем, значении напряжения на коллекторе.

3. Снять выходную статическую характеристику транзистора $I_k(U_k)$ при $I_6 = \text{const}$:

а) с помощью потенциометра в цепи базы транзистора установить ток базы заданного значения;

б) изменяя напряжение U_k потенциометром R_4 в цепи коллектора от нулевого значения до 15 В, измерить ток коллектора I_k транзистора. Произвести измерения тока коллектора при пяти различных значениях напряжения U_k . Результаты измерений нанести на график $I_k(U_k)$ при $I_6 = \text{const}$;

в) произвести аналогичные измерения при двух других значениях тока базы; перед каждым измерением необходимо подрегулировать ток базы транзистора (значения тока базы, при которых снимаются выходные характеристики, задаются преподавателем).

4. Ознакомиться с однокаскадным усилителем напряжения, схема которого приведена на рис. 8.14 и собрана на рабочей панели лабораторного стенда, и произвести исследование влияния параметров элементов усилительного каскада, выполненного на транзисторе по схеме с общим эмиттером, на его амплитудно-частотную характеристику $K(f)$; для этого к исследуемому усилителю подключить:

а) источник входного сигнала — звуковой генератор;

б) цифровой вольтметр для измерения напряжения входного сигнала;

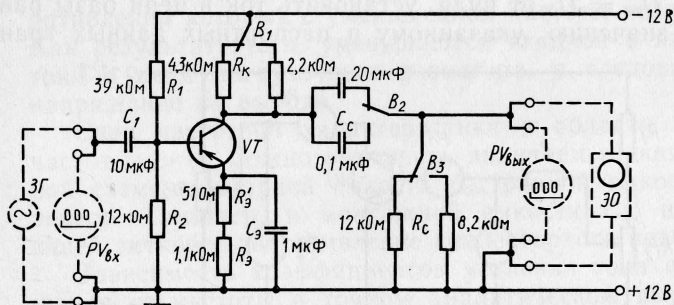


Рис. 8.14

в) цифровой вольтметр для измерения напряжения выходного сигнала;

г) источник питания усилителя — источник стабилизированного постоянного напряжения с уровнем $U = 12$ В. Обратить внимание на то, чтобы выводы «земля» всех подключенных к усилителю приборов были соединены между собой и подключены к выводу «земля» стенда;

д) переключателями на панели установить параметры элементов схемы усилителя по варианту I табл. 8.1;

Т а б л и ц а 8.1

Номера вариантов	Параметры элементов схемы усилительного каскада		
	R_k , кОм	R_c , кОм	C_c , мкФ
I	4,3	12,0	20,0
II	2,2	12,0	20,0
III	4,3	12,0	0,1
IV	4,3	8,2	20,0

е) включить напряжение питания измерительных приборов, звукового генератора и усилительного каскада; снять и построить амплитудно-частотную характеристику $K(f)$ усилительного каскада для диапазона частот 200—200 000 Гц, поддерживая при этом напряжение входного сигнала неизменным и равным $U_{вх} = 5$ мВ (замеры произвести на частотах: 200, 500, 1000, 2000, 5000; 10 000, 20 000, 50 000, 100 000, 200 000 Гц). При построении амплитудно-частотной характеристики $K(f)$ по оси ординат откладывается коэффициент усиления по напряжению $K = U_{вых}/U_{вх}$, а по оси абсцисс — частота входного сигнала f в логарифмическом масштабе;

ж) снять и построить аналогичные характеристики при других значениях параметров элементов усилителя в соответствии с вариантами II, III, IV табл. 8.1.

5. Снять и построить амплитудную характеристику $U_{вых}(U_{вх})$ усилительного каскада, собранного по варианту I на частоте $f = 1$ кГц, изменяя $U_{вх}$ от нулевого значения до значения, при котором наблюдается заметное искажение формы выходного сигнала. Зарисовать на

кальку с экрана осциллографа, включенного на выход усилителя, осциллограммы выходного напряжения для линейного и нелинейного участков характеристики.

6. Произвести обработку результатов опытов:

а) по входным характеристикам, полученным при выполнении опыта по п. 2, определить характеристические h -параметры транзистора (h_{11} — входное сопротивление, h_{12} — коэффициент внутренней обратной связи), для этого на характеристиках построить характеристический треугольник;

б) по выходным характеристикам (п. 3) определить параметры h_{21} — коэффициент усиления по току и h_{22} — выходную проводимость транзистора; характеристические треугольники строить на линейных участках характеристик;

в) по одной из амплитудно-частотных характеристик (п. 4) определить полосу пропускания усилителя (f_n — f_v);

г) по амплитудной характеристике $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ определить коэффициент усиления по напряжению K на линейном участке характеристики и сравнить его с коэффициентом усиления, полученным по амплитудно-частотной характеристике;

д) по амплитудной характеристике определить динамический диапазон работы усилителя.

Контрольные вопросы

1. Назовите типы транзисторов.
2. Укажите схемы включения транзисторов.
3. Установите взаимосвязь между токами эмиттера, коллектора и базы транзистора.
4. Приведите семейство входных и выходных характеристик транзистора, включенного по схеме с общей базой.
5. Как по статическим характеристикам транзистора определить коэффициент усиления по току K_i в схеме с общим эмиттером?
6. Укажите преимущества схемы включения транзистора с общим эмиттером по сравнению со схемой с общей базой.
7. Нарисуйте типовую схему усилительного каскада с общим эмиттером.
8. Поясните, как влияет увеличение сопротивления резистора R_k на коэффициент усиления усилительного каскада с общим эмиттером?
9. Поясните назначение делителя напряжения R_1 — R_2 в схеме усилительного каскада с общим эмиттером.
10. Укажите назначение цепи R_3 — C_3 в усилительном каскаде с общим эмиттером.

Лабораторная работа 9

Двухкаскадный усилитель с обратной связью на транзисторах

Цель работы. Исследование влияния цепи отрицательной обратной связи на амплитудно-частотную и амплитудные характеристики двухкаскадного усилителя на транзисторах с реостатно-емкостной связью.

Основные теоретические положения

В тех случаях, когда коэффициент усиления усилительной ячейки оказывается недостаточным, усилитель собирается из нескольких последовательно или параллельно включенных усилительных ячеек (каскадов).

Структурная схема многокаскадного усилителя приведена на рис. 9.1. Связь между усилительными ячейками

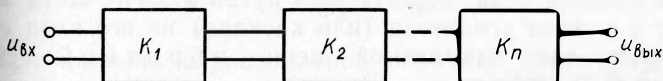


Рис. 9.1

многокаскадного усилителя осуществляется различными способами. При этом различают непосредственную (гальваническую), реостатно-емкостную и трансформаторную связь.

Усилители с реостатно-емкостной связью имеют конденсатор связи C_c и резистор R_c , включенный параллельно входу следующего усилительного каскада.

При трансформаторной связи выход предыдущего усилительного каскада связан с входом последующего каскада с помощью трансформатора. При непосредственном виде связи вход последующего усилительного каскада соединяется с выходом предыдущего усилительного каскада с помощью резисторов.

Основным видом связи в усилителях электронных устройств является реостатно-емкостная связь ввиду простоты, малых габаритов и небольшой массы. Реостатно-емкостная связь находит применение и в электронных генераторах.

Коэффициент усиления многокаскадного усилителя может быть принят равным произведению коэффициентов усиления всех каскадов:

$$K = K_1 K_2 K_3 \dots K_n,$$

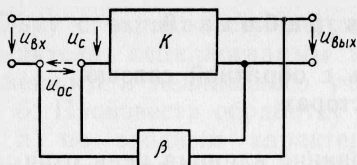


Рис. 9.2

где $K_1, K_2, K_3, \dots, K_n$ — коэффициенты усиления соответственно первого, второго и т. д. усилительных каскадов.

Основной характеристикой многокаскадных усилителей является амплитудно-частотная характеристика, которая имеет такой же вид, как и для однокаскадных усилителей (см. рис. 8.11).

Для получения широкополосной частотной характеристики в схему усилителя вводятся цепи коррекции по низкой и высокой частотам, а также цепи обратной связи.

При этом под обратной связью понимается воздействие электрических колебаний на выходе усилителя на режим его входной цепи, достигаемый путем подачи части энергии с выхода усилителя (или каскада) на его вход с помощью так называемой цепи обратной связи (рис. 9.2).

Различают обратную связь по напряжению и току. При наличии обратной связи по *напряжению* напряжение обратной связи U_{oc} подается на вход усилителя через цепь обратной связи с выхода усилителя. Аналогичным образом осуществляется и обратная связь по *току*. При необходимости может применяться и комбинированная система обратной связи. В том случае, когда в результате действия обратной связи выходное напряжение или ток уменьшается, обратная связь является отрицательной; в противном случае она положительная.

Комплексный коэффициент усиления K_{oc} усилителя при наличии обратной связи в общем случае может быть найден как отношение комплексного выходного напряжения $\dot{U}_{вых}$ к комплексному входному $\dot{U}_{вх}$ напряжению: $K_{oc} = \dot{U}_{вых} / \dot{U}_{вх}$.

Выражение для выходного напряжения при наличии положительной обратной связи (сплошная стрелка на рис. 9.2) может быть получено из схемы рис. 9.2: $\dot{U}_{вых} = K\dot{U}_{вх} + K\beta_{oc}\dot{U}_{вых}$,

$$\dot{U}_{вых} (1 - K\beta_{oc}) = K\dot{U}_{вх},$$

где K — комплексный коэффициент усиления усилителя без обратной связи; $\beta_{oc} = \dot{U}_{oc} / \dot{U}_{вых}$ — комплексный коэффициент передачи цепи обратной связи, определяемый

как отношение комплексного напряжения на выходе цепи обратной связи к комплексному напряжению на ее входе.

Коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$\underline{K}_{oc} = \dot{U}_{вых} / \dot{U}_{вх} = \underline{K} / (1 - \underline{K}\beta_{oc}).$$

Представив комплексный коэффициент усиления усилителя без обратной связи и комплексный коэффициент передачи цепи обратной связи в показательной форме, имеем:

$$\underline{K} = Ke^{j\psi_k}, \quad \beta_{oc} = \beta_{oc}e^{j\psi_\beta},$$

где ψ_k и ψ_β — углы сдвига фаз напряжения сигнала соответственно при прохождении через усилитель и цепь обратной связи.

С учетом этого комплексный коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$\underline{K}_{oc} = \frac{Ke^{j\psi_k}}{1 - K\beta_{oc}e^{j(\psi_k + \psi_\beta)}}.$$

При наличии отрицательной обратной связи (пунктирная стрелка напряжения обратной связи рис. 9.2) в выражении для комплекса напряжений вместо знака минус появится знак плюс: $\dot{U}_{вых}(1 + \underline{K}\beta_{oc}) = \underline{K}\dot{U}_{вх}$, т. е. при $\psi_k + \psi_\beta = \pi$ в выражении для \underline{K}_{oc} (при угле сдвига по фазе, равном 180°) обратная связь будет отрицательной и произведение $\beta_{oc}\underline{K} = -\beta_{oc}K$, представляющее собой вещественное значение, будет отрицательным.

Переходя от комплексного выражения для коэффициента усиления усилителя с отрицательной обратной связью к его модулю, имеем

$$K_{oc} = K / (1 + \beta_{oc}K).$$

Из этой формулы следует, что при введении в усилитель отрицательной обратной связи коэффициент усиления усилителя уменьшается в $(1 + \beta_{oc}K)$ раз.

Если $\psi_k + \psi_\beta = 0$, то обратная связь становится положительной. При этом произведение $\beta_{oc}\underline{K} = \beta_{oc}K$ представляет собой вещественное положительное значение, а модуль коэффициента усиления

$$K_{oc} = K / (1 - \beta_{oc}K).$$

В усилителях широко используется отрицательная обратная связь, которая является эффективным средством повышения качества их работы. При этом можно получить более стабильный коэффициент усиления и рас-

ширить полосу пропускания усилителя при уменьшении нелинейных искажений и ослаблении действия помех. При наличии отрицательной обратной связи происходит увеличение входного и уменьшение выходного сопротивлений усилителя, что в ряде случаев имеет большое практическое значение.

Если коэффициент усиления усилителя без обратной связи по каким-либо причинам изменяется в a раз, то с введением отрицательной обратной связи при действии тех же причин $K_{ос}$ изменится лишь в $a/(1 + \beta_{ос}K)$ раз. Это означает, что при введении отрицательной обратной связи происходит повышение стабильности коэффициента усиления, а следовательно, расширение полосы пропускания частотной характеристики усилителя при одновременном уменьшении коэффициента усиления.

В связи с этим для сохранения необходимого значения выходного напряжения при введении отрицательной обратной связи необходимо увеличивать значение входного сигнала или число усилительных каскадов усилителя.

При введении положительной обратной связи коэффициент усиления K усилителя увеличивается, что при некоторых условиях может привести к явлению самовозбуждения с последующим переходом работы усилителя в генераторный режим. Поэтому положительная обратная связь применяется главным образом для генераторов.

Ранее было указано, что вследствие неравномерного усиления усилителем сигналов различных частот возникают частотные искажения. Кроме частотных искажений в усилителе имеют место амплитудные нелинейные искажения. Величина этих искажений зависит от амплитуды входного сигнала.

Зависимость, связывающая амплитуду сигналов на выходе усилителя с амплитудой сигналов на его входе при постоянной частоте сигналов, т. е. $U_{вых м} (U_{вх м})$, называют амплитудной характеристикой усилителя (рис. 9.3).

При введении обратной связи динамический диапазон работы усилителя D увеличивается. Нелинейность амплитудной характеристики обусловлена наличием в схеме нелинейных элементов электронных ламп, транзисторов, трансформаторов, дросселей и др.

Наряду с частотными и амплитудными искажениями в усилителе существуют еще так называемые фазо-

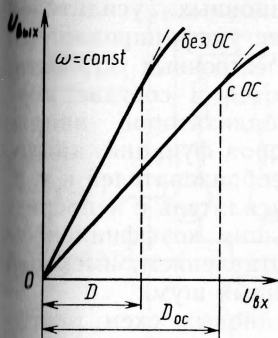


Рис. 9.3

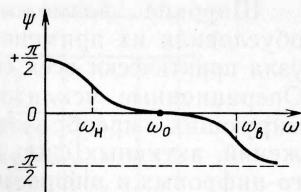


Рис. 9.4

вые искажения, возникающие вследствие фазовых сдвигов, вносимых усилителем для составляющих частот входного сложного сигнала. Это происходит потому, что при усилении несинусоидальных сигналов начальные фазы отдельных его гармонических составляющих изменяются из-за влияния реактивных элементов усилителя. В результате этого форма напряжения на выходе усилителя в той или иной мере может отличаться от формы напряжения на его входе.

Фазовые искажения отсутствуют в том случае, когда начальные фазы отдельных гармонических составляющих напряжения в процессе усиления не изменяются и угол сдвига фаз пропорционален частоте усиливаемого сигнала.

Фазовые искажения, вносимые усилителем, оцениваются по его фазовой характеристике (рис. 9.4), представляющей собой зависимость угла сдвига фаз между входным и выходным напряжениями от частоты. Наиболее благоприятные условия работы усилителя возникают, когда частота не оказывает влияния на фазу усиливаемого сигнала.

Процессы и явления, происходящие в различных физических системах (электрических, механических, гидравлических и т. д.), несмотря на различную их физическую природу, могут быть описаны сходными математическими (линейными и нелинейными) уравнениями, в частности дифференциальными, решать которые удобно, используя электронные моделирующие устройства (аналоговые электронные вычислительные машины). Большинство предназначенных для этой цели электронных устройств построены на базе операционных усилителей*.

* Термин «операционный усилитель» первоначально означал конкретный тип усилителя, применяемого в аналоговых вычислительных машинах для выполнения чисто математических операций, таких, как суммирование, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т. д.

Широкие возможности операционных усилителей обусловили их применение в качестве унифицированного узла практически всех современных электронных устройств. Операционные усилители используются в составе нормирующих преобразователей, стабилизаторов напряжений, активных фильтров, генераторов функций, аналого-цифровых и цифроаналоговых преобразователей и т. д.

Операционный усилитель — это усилитель с непосредственной связью, обладающий большим коэффициентом усиления и высоким входным сопротивлением, имеющий малый дрейф нуля и малый собственный шум.

Существует много различных типовых схем операционных усилителей, выполненных на ламповых и полупроводниковых приборах. Эти схемы отличаются друг от друга значениями коэффициента усиления K , схемой компенсации дрейфа нуля и схемой выходного каскада усилителя, обеспечивающей необходимую выходную мощность.

В современных электронных вычислительных машинах и цифровых измерительных приборах функциональные узлы, преобразующие аналоговые сигналы, выполняются преимущественно с использованием операционных усилителей, представляющих собой дифференциальные усилители с отрицательной обратной связью по току или напряжению.

Принцип действия операционного усилителя может быть проиллюстрирован на упрощенной электрической схеме интегральной микросхемы К1УТ401 (А, Б), используемой в качестве усилителя постоянного и переменного токов (рис. 9.5). Она является трехкаскадным усилителем, первый каскад которого выполнен на транзисторах VT_1 и VT_2 и является симметричным дифференциальным балансным усилителем, в эмиттерную цепь которого включен стабилизатор тока на транзисторе VT_3 . Напряжения входных сигналов (или одного из них) подаются на базы транзисторов VT_1 и VT_2 и общую точку 0 с нулевым потенциалом. Выходное напряжение каскада снимается между коллекторами транзисторов VT_1 и VT_2 и подается на соответствующие входы второго каскада. Напряжение питания усилителя осуществляется от двух источников ЭДС — $(+E_{п1}$ и $-E_{п2})$, включенных последовательно, общая точка которых соединена с общей точкой усилителя.

При подаче на первый вход положительного напряжения $u_{вх1}$ (при $u_{вх2} = 0$) ток базы транзистора VT_1

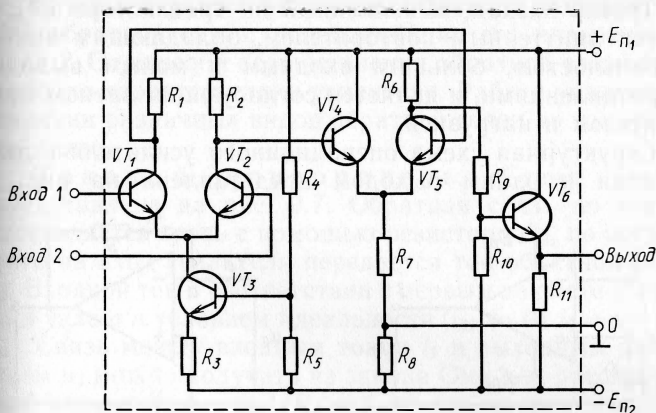


Рис. 9.5

увеличивается, одновременно с этим уменьшается на такую же величину ток базы транзистора VT_2 , что вызывает равные по величине, но обратные по знаку изменения коллекторных токов транзисторов VT_1 и VT_2 , а следовательно, результирующий ток транзистора VT_3 остается неизменным. Выходное напряжение определяется при этом разностью коллекторных потенциалов транзисторов $u_{вых} = \varphi_{к2} - \varphi_{к1}$. Аналогично, при подаче на второй вход усилителя такого же положительного напряжения $u_{вх2}$ и $u_{вх1} = 0$ выходное напряжение будет таким же по значению, но обратной полярности. Поэтому вход 1, входное напряжение которого совпадает по фазе с выходным, называют **нелинвертирующим** и обозначают на структурной схеме — «+», а вход 2, входное напряжение которого находится в противофазе с выходным — **инвертирующим**, — «—». При одновременной подаче одинаковых по значению и знаку входных напряжений на оба входа усилителя выходное напряжение оказывается равным нулю. Таким образом, выходное напряжение каскада пропорционально разности входных напряжений.

Второй каскад усилителя выполнен по несимметричной балансной схеме на транзисторах VT_4 и VT_5 . Выходное напряжение с него снимается со средней точки делителя напряжений R_9 , R_{10} и общей точки усилителя. Сопровитвления резисторов делителя подобраны таким образом, чтобы при отсутствии входных сигналов выходное напряжение каскада было равным нулю.

Третий каскад, выполненный на транзисторе VT_6 , является эмиттерным повторителем, обладающим высокой стабильностью, большим входным и малым выходным сопротивлениями, и является согласующим звеном между делителем и нагрузкой.

Структурная схема операционного усилителя с двумя входами и одним выходом представлена на рис. 9.6

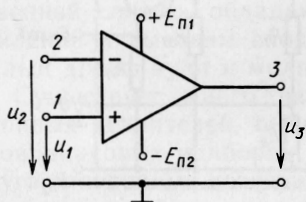


Рис. 9.6

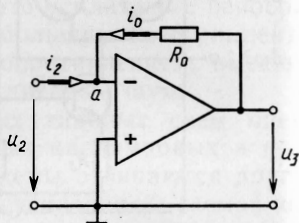


Рис. 9.7

Здесь вход 1 — неинвертирующий, входное напряжение — u_1 . Вход 2 — инвертирующий, входное напряжение — u_2 . Выходное напряжение $u_{\text{вых}} = u_3$. Разность потенциалов между входами 2 и 1: $u_{21} = u_2 - u_1$ усиливается усилителем в A раз и одновременно инвертируется.

Таким образом, выходное напряжение усилителя: $u_3 = -Au_{21}$, где u_{21} — напряжение между инвертируемым и неинвертируемым входами; A — коэффициент усиления усилителя.

Напряжение u_3 на выходе усилителя можно рассматривать как сумму инвертируемого и усиленного в A раз входного напряжения u_2 и неинвертируемого и усиленного в A раз входного напряжения u_1 , т. е. $u_3 = -Au_2 + Au_1$. Полученные уравнения для u_3 эквивалентны, так как $u_{21} = u_2 - u_1$.

Идеальным операционным усилителем принято считать усилитель, у которого коэффициент усиления A и входное сопротивление бесконечно большие, а выходное сопротивление равно нулю при наличии бесконечно широкой полосы пропускания. Реальные операционные усилители имеют коэффициент усиления медленно изменяющегося тока $A = 10^4 - 10^8$, входное сопротивление от 10^5 до 10^{13} Ом и ширину полосы пропускания от нуля до единиц мегагерц. Для повышения стабильности работы операционного усилителя вводят как внешние, так и внутренние обратные связи.

Стабилизируется усилитель обычно с помощью внешней обратной связи, подаваемой на его инвертирующий вход 2. От способа осуществления обратной связи зависят рабочие характеристики усилителя. Работа усилителя при наличии различных видов обратной связи по току изложена далее.

Токовый повторитель. Схема усилителя представлена на рис. 9.7. Обратная связь по току осуществляется здесь с помощью резистора R_0 , по цепи которого на вход усилителя передается ток обратной связи — i_0 . Входной ток в соответствии с первым законом Кирхгофа для узла a и условием идеальности ($i_{21} = 0$) $i_2 = -i_0$.

Связь между входным током i_2 и выходным напряжением u_3 можно получить из закона Ома для рассматриваемой схемы: $(u_3 - u_{21})/R_0 = i_0$.

Представляя u_{21} через коэффициент усиления, получим $u_3(1 + 1/A) = -i_2 R_0$, так как $A \gg 1$, выходное напряжение, записанное через входной ток, $u_3 = -i_2 R_0$.

Таким образом, выходное напряжение в данном случае пропорционально входному току, а коэффициент пропорциональности определяется сопротивлением резистора обратной связи R_0 .

Рассмотренное устройство называется токовым повторителем (конвертера тока в напряжение).

Потенциал точки a относительно нулевой шины, а следовательно относительно входа 1, равен $u_{21} = -u_3/A$ и для обычного операционного усилителя составляет всего $\pm 15 \text{ В}/10^5$ или $\pm 150 \text{ мВ}$. Поэтому потенциал этой точки принято считать равным нулю, а точку — заземленной.

Указанная особенность схемы имеет большое значение, так как она дает возможность преобразовывать ток в эквивалентное напряжение, причем источник тока при этом остается практически под потенциалом земли. Эта возможность используется в схеме потенциостата.

Счетчик-преобразователь. На базе схемы усилителя (рис. 9.7) можно получить схему счетчика (рис. 9.8), на выходе которого действует преобразованное входное напряжение (умноженное на заданный коэффициент усиления). Представив входной ток i_2 в выражении для u_3 через напряжение u_2 и сопротивление R_2 , получаем $u_3 = -u_2 R_0/R_2$. При $R_0 = R_2$ схема рис. 9.8 выполняет функцию преобразователя напряжения по знаку (инвертор).

Сумматор. На рис. 9.9 приведена схема операционного усилителя, выполняющего функцию суммирования изме-

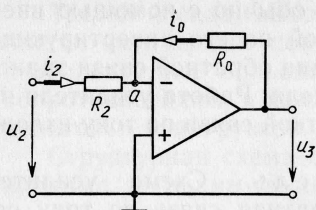


Рис. 9.8

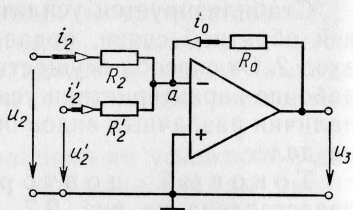


Рис. 9.9

ненных по величине входных напряжений. В этой схеме разные напряжения u_2 и u'_2 создают на инвертируемом входе 2 входные токи i_2 и i'_2 . Для точки a имеем $i_2 + i'_2 = i_0$.

Выражая токи через соответствующие напряжения и сопротивления, получим $u_3/R_0 = -[(u_2/R_2) + (u'_2/R'_2)]$ или $u_3 = -[u_2(R_0/R_2) + u'_2(R_0/R'_2)]$. Следовательно, выходное напряжение u_3 представляет сумму независимо измененных по величине входных напряжений u_2 и u'_2 . При одинаковых по величине коэффициентах изменения, равных единице, получим простой инвертирующий сумматор. При этом напряжение $u_3 = -(u_2 + u'_2)$.

Интегратор тока. При наличии в цепи внешней обратной связи конденсатора C вместо резистора R_0 (рис. 9.10) напряжение на выходе усилителя оказывается пропорциональным интегралу входного тока.

Так как потенциал точки a фактически равен потенциалу земли, то ток в цепи обратной связи $i_0 = Cdu_3/dt = -i_2$ или $u_3 = \frac{1}{C} \int i_2 dt$. Таким образом, напряжение на выходе усилителя будет пропорционально интегралу входного тока или заряду, накопленному на конденсаторе C за заданный промежуток времени*.

Интегратор напряжения. Входное напряжение можно интегрировать с помощью устройства, схема которого приведена на рис. 9.11.

Если в уравнении для u_3 представить ток i_2 через входное напряжение и сопротивление резистора R_2 , получаем $u_3 = -\frac{1}{R_2 C} \int u_2 dt$, т. е. напряжение на выходе усилителя оказывается пропорционально интегралу входного напряжения. Рассматриваемый интегратор напряжения можно использовать как генератор пилообразного напряжения

* Для проведения нового измерения конденсатор необходимо разрядить, для этого параллельно ему включается выключатель B .

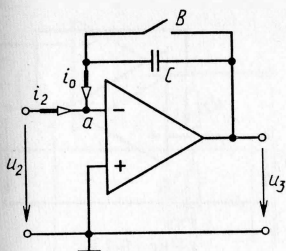


Рис. 9.10

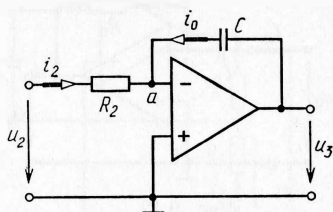


Рис. 9.11

с регулируемой скоростью нарастания напряжения и изменяемой полярностью, так как при $u_2 = \text{const}$ выражение для u_3 преобразуется к виду $u_3 = -\frac{u_2}{R_2 C} t$.

Дифференциатор. Усилитель, выполненный по схеме рис. 9.12, имеет на выходе напряжение, пропорциональное производной входного напряжения. В рассматриваемой схеме токи i_2 и i_0 можно выразить через напряжения u_2 и u_3 следующим образом: $-C_2 du_2/dt = u_3/R_0$, поэтому $u_3 = -R_0 C_2 du_2/dt$.

Следовательно, выходное напряжение равно измененной в $R_0 C_2$ раз производной по времени входного напряжения.

Наряду с широким использованием в операционных усилителях обратных связей по току значительное применение в них получили и обратные связи по напряжению. Отрицательная обратная связь по напряжению, как известно, стабилизирует работу усилителя, повышает его входное сопротивление, а следовательно, усилители с обратными связями по напряжению целесообразно использовать для регулирования и измерения напряжения.

В то же время схемы операционных усилителей с обратной связью по току больше подходят для устройств, предназначенных для обработки сигнала. Далее приведены схемы операционных усилителей с обратными связями по напряжению.

Повторитель напряжения. На рис. 9.13 представлена схема операционного усилителя, в которой выходное напряжение полностью передается на инвертируемый его вход. Учитывая, что связь напряжений на входе и выходе усилителя может быть выражена уравнением $u_3 = -A u_{21}$ и принимая во внимание, что для рассматриваемой схемы $u_{21} = u_3 - u_1$, получаем $u_3 = A(u_3 - u_1)$ или $u_3 = u_1/(1 + 1/A)$. Так как коэффициент усиления усилителя A весь-

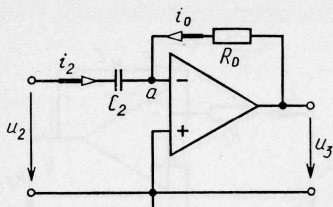


Рис. 9.12

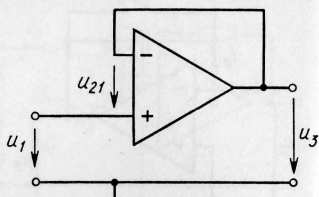


Рис. 9.13

ма большой, выходное напряжение в этом случае равно входному, т. е. $u_3 = u_1$.

Схема рис. 9.13 является схемой повторителя напряжения, в которой выходное напряжение равно входному. Повторитель напряжения можно использовать как согласующее звено между источником напряжения, имеющим очень большое внутреннее сопротивление, и измерителем. Схема позволяет производить измерения напряжения без заметных искажений его значения.

Регуляторы напряжения (потенциала) и тока. В схеме усилителя, приведенной на рис. 9.14, цепь обратной связи по напряжению включает источник входного напряжения u_2 , который для простоты изображен в виде источника ЭДС e_2 .

Входное напряжение обуславливает напряжение u_A и потенциал точки A относительно земли определенного значения и знака $u_A = -u_2$, т. е. инвертирующий вход 2 усилителя фактически имеет потенциал земли. При изменениях сопротивлений резисторов R_3 и R'_3 на выходе усилителя выходное напряжение u_3 будет автоматически воздействовать на ток i_3 так, чтобы сохранилось равенство $u_A = -u_2$.

Действительно, на основании закона Ома $i_3 = u_1/R'_3 = -u_2/R'_3$, а выходное напряжение $u_3 = i_3(R_3 + R'_3) = -u_2(R_3 + R'_3)/R'_3$.

Из последнего выражения следует, что при постоянном напряжении на входе электрической цепи ($u_2 = \text{const}$) и переменной нагрузке на выходе усилителя ($R_3 = \text{var}$ и $R'_3 = \text{var}$) выходное напряжение изменяется так, что произведение $i_3 R'_3$ остается неизменным, так как из последнего выражения следует, что $u_2 = -u_A = -u_3 R'_3 / (R_3 + R'_3) = -i_3 R'_3 = \text{const}$.

Следовательно, схема рис. 9.14 может быть использована в качестве регулятора напряжения и потенциала, а также для регулирования тока в цепи нагрузки, полное сопротивление которой Z_n является переменной величиной. На-

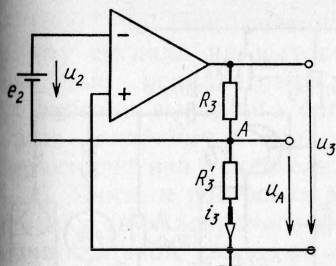


Рис. 9.14

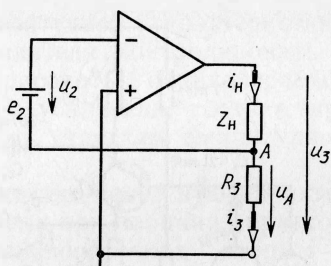


Рис. 9.15

грузки включена на выход усилителя последовательно с резистором постоянного сопротивления R_3 (рис. 9.15). Напряжение на резисторе R_3 , а следовательно, и потенциал точки A есть постоянная величина, равная $u_A = -u_2$, поэтому ток i_H в цепи нагрузки, равный $i_3 = u_2/R_3$, не зависит от величины Z_H или ее изменений. При этом отбора тока по цепи обратной связи по напряжению нет, так как ранее установленное условие равенства потенциалу земли входа 2 сохраняется.

Задание по работе

1. Снять и построить амплитудно-частотную и амплитудную характеристики двухкаскадного усилителя на транзисторах с реостатно-емкостной связью между каскадами.
2. Снять и построить амплитудно-частотную и амплитудную характеристики двухкаскадного усилителя на транзисторах с реостатно-емкостной связью при наличии отрицательной обратной связи.
3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по работе

1. Ознакомиться со схемой лабораторной установки для исследования двухкаскадного усилителя на транзисторах с реостатно-емкостной связью (рис. 9.16), измерительными приборами и оборудованием, необходимым при выполнении работы.

2. Подготовить лабораторную установку к выполнению работы. Для этого к выходу и входу усилителя подключить:

- а) источник входного синусоидального сигнала переменной частоты — звуковой генератор (ЗГ);

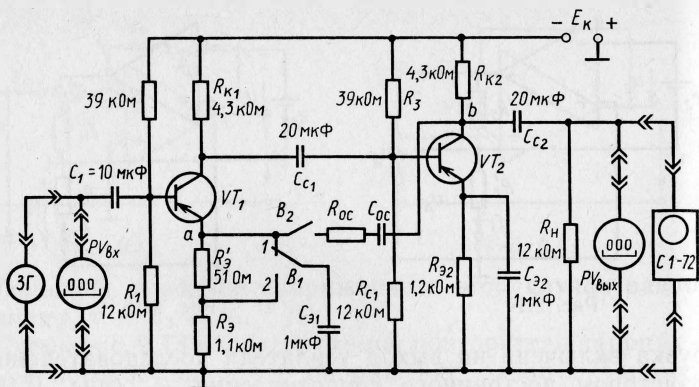


Рис 9.16

- б) цифровой вольтметр для контроля значения входного сигнала;
- в) цифровой вольтметр для измерения значения выходного сигнала;
- г) стабилизированный источник постоянного напряжения питания $U = 12 \text{ В}$;
- д) осциллограф для контроля формы выходного сигнала усилителя.

3. Включить напряжение питания измерительных приборов, звукового генератора и исследуемого усилителя и установить на выходе звукового генератора напряжение $U_{\text{вх}} = 5 \text{ мВ}$. При этом выключатель B_1 находится в верхнем положении (в положении 1), а выключатель B_2 разомкнут.

4. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику двухкаскадного усилителя в диапазоне частот от 200 до 200 000 Гц, поддерживая напряжение сигнала на входе усилителя неизменным. Измерения напряжений сигнала на входе и выходе усилителя произвести при частотах: 200, 500, 1000, 2000, 5000, 10 000, 20 000, 50 000, 100 000, 200 000 Гц.

При построении амплитудно-частотной характеристики $K(f)$ по оси ординат откладывается коэффициент усиления усилителя по напряжению, равный $K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}}$, а по оси абсцисс — частота входного сигнала в логарифмическом масштабе. Значение коэффициента усиления по результатам измерений наносится на график $K(f)$.

5. Снять и построить амплитудную характеристику $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ усилителя при частоте входного сигнала $f =$

= 1000 Гц. При снятии амплитудной характеристики форму сигнала на выходе усилителя контролировать с помощью осциллографа. Зарисовать осциллограммы входного и выходного сигналов усилителя, соответствующих линейному и нелинейному участкам амплитудной характеристики усилителя.

6. Снять и построить амплитудно-частотную характеристику двухкаскадного усилителя при наличии обратной отрицательной связи по напряжению между вторым и первым каскадами. Цепь обратной связи R_{oc} , C_{oc} включается выключателем B_2 к точкам a и b в схеме усилителя (см. рис. 9.16). В этом случае конденсатор цепи температурной компенсации C_3 первого каскада должен быть подключен параллельно только резистору R'_{31} , выключатель B_1 переключить в положение 2. Построение амплитудно-частотной характеристики произвести на том же графике и в том же масштабе, на котором построена частотная характеристика усилителя без обратной связи.

7. Снять и построить амплитудную характеристику усилителя с отрицательной обратной связью по напряжению. Построение характеристики выполнить на графике амплитудной характеристики, снятой в п. 5.

8. Провести обработку результатов опытов:

а) по полученным в п. 4 и 6 частотным характеристикам $K(f)$ усилителя определить рабочий диапазон частот усилителя без отрицательной обратной связи и при наличии ее;

б) по полученным в п. 5 и 7 амплитудным характеристикам $U_{вых}$ ($U_{вх}$) усилителя определить динамические диапазоны усилителя без обратной связи и при наличии ее.

Контрольные вопросы

1. Укажите виды междукаскадных связей, применяемых в многокаскадных усилителях.

2. Объясните наличие спадов амплитудно-частотной характеристики усилителя в области низких и высоких частот.

3. Поясните, как увеличить коэффициент усиления многокаскадного усилителя в области низких частот.

4. Поясните причину появления искажения формы выходного сигнала усилителя.

5. Дайте определение амплитудной характеристики усилителя.

6. Укажите виды обратных связей, применяемых в усилителях.

7. Как влияет отрицательная обратная связь на амплитудно-частотную характеристику усилителя?

8. Запишите выражение для коэффициента усиления усилителя с отрицательной обратной связью.

9. Объясните влияние положительной обратной связи на работу усилителя.

10. В каких электронных устройствах применяется положительная обратная связь?

Лабораторная работа 10

Катушка индуктивности с магнитопроводом

Цель работы. Исследование катушки индуктивности с магнитопроводом, имеющим регулируемый воздушный зазор, и ее вольт-амперных характеристик при намагничивании магнитопровода переменным и постоянным токами; изучение влияния напряжения и воздушного зазора магнитопровода на ток и параметры катушки индуктивности.

Основные теоретические положения

Основным элементом конструкции различного рода электрических машин и аппаратов, устройств электроавтоматики, промышленной электроники, вычислительной техники и т. д. является катушка индуктивности.

При протекании тока по виткам катушки с поперечным сечением s создается магнитное поле, интенсивность которого характеризуется магнитной индукцией B и магнитным потоком $\Phi = Bs$, который пропорционален магнитодвижущей силе $F = I\omega$, равной произведению тока I катушки на число ее витков ω . Зависимость $\Phi(I)$ при $\omega = \text{const}$ катушки при отсутствии ферромагнитного магнитопровода является линейной.

При наличии магнитопровода магнитный поток, создаваемый подобной катушкой индуктивности (дросселем), при прочих равных условиях значительно возрастает, так как при этом магнитный поток создается не только непосредственно проводниками с током катушки (источником внешнего магнитного поля), но и соответствующим ферромагнитным веществом магнитопровода (источником внутреннего магнитного поля).

Магнитная индукция катушки индуктивности связана с напряженностью H магнитного поля и магнитной проницаемостью μ известным соотношением $B = \mu H$.

С учетом этого магнитный поток катушки

$$\Phi = Bs = \mu Hs.$$

Отсюда следует, что магнитный поток пропорционален

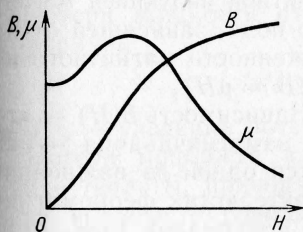


Рис. 10.1

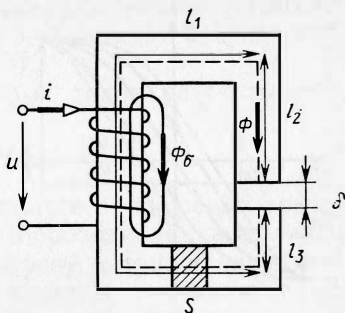


Рис. 10.2

магнитной проницаемости μ среды, которая для ферромагнитных материалов значительно больше магнитной проницаемости других материалов и на несколько порядков выше магнитной проницаемости μ_0 воздуха (вакуума). Поэтому для уменьшения намагничивающей силы F , а следовательно, уменьшения тока, необходимого для создания заданного магнитного потока, катушки индуктивности снабжаются магнитопроводом (сердечником) из ферромагнитного материала, чаще всего из электротехнической стали.

Так как зависимость магнитной проницаемости ферромагнитных материалов $\mu(H)$ является нелинейной (рис. 10.1), то зависимость $\Phi(H)$ или $B(H)$ при наличии магнитопровода оказывается также нелинейной.

При включении катушки индуктивности с магнитопроводом (в общем случае с воздушным зазором δ рис. 10.2) под переменное синусоидальное напряжение $u(t) = U_m \sin \omega t$ в цепи катушки появляется переменный ток $i_0(t)$, под действием которого в магнитопроводе возникает переменный магнитный поток $\Phi(t)$. Основная часть результирующего магнитного потока Φ_p , создаваемого катушкой индуктивности (основной магнитный поток Φ), замыкается по цепи магнитопровода, так как магнитная проводимость его во много раз больше магнитной проводимости воздуха, однако незначительная часть результирующего потока (порядка 3—5 %) все же рассеивается и замыкается вокруг отдельных витков катушки индуктивности (поток рассеяния Φ_σ).

Результирующий магнитный поток катушки индуктивности с магнитопроводом равен векторной сумме $\dot{\Phi}_p = \dot{\Phi} + \dot{\Phi}_\sigma$, так как основной магнитный поток Φ и поток рассеяния Φ_σ не совпадают во времени по фазе.

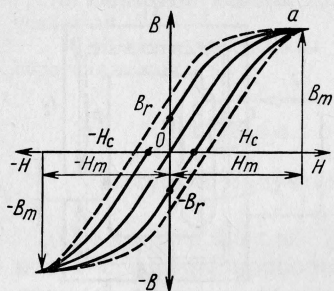


Рис. 10.3

Величина магнитного потока $\Phi = Bs$ определяется магнитной индукцией магнитного поля, зависящей от напряженности магнитного поля ($B = \mu H$).

Зависимость $B(H)$ — кривая намагничивания — является одной из важнейших характеристик ферромагнитных материалов (рис. 10.3).

Кривая oa , проходящая через начало координат, является основной кривой намагничивания, она снимается при одностороннем намагничивании ненамагниченного материала.

При питании катушки переменным током ферромагнитный магнитопровод вследствие наличия переменного магнитного потока циклически, с частотой тока, перемагничивается по кривой гистерезиса, обусловленной наличием остаточного магнетизма (остаточной магнитной индукции) B_r и коэрцитивной (задерживающей) силы H_c (рис. 10.3). В процессе циклического перемагничивания за несколько полупериодов переменного тока устанавливается замкнутая симметричная петля гистерезиса.

На циклическое перемагничивание магнитопровода затрачивается мощность, выделяемая в нем в виде теплоты, которая относится к потерям мощности в магнитопроводе.

Потери мощности в магнитопроводе P_m (потери мощности в стали) включают в себя потери на гистерезис P_r и потери от вихревых токов P_v , наводимых переменным магнитным потоком в металле магнитопровода: $P_m = P_r + P_v$.

Потери мощности на гистерезис, пропорциональные площади, ограниченной статическими петлями гистерезиса (см. рис. 10.3), определяют по формуле

$$P_r = P_{y\Gamma} f B_m^2 G,$$

где $P_{y\Gamma}$ — удельные потери мощности на гистерезис; f — частота питающего тока; B_m — амплитудное значение магнитной индукции; G — масса магнитопровода.

Под действием изменяющегося во времени магнитного потока в магнитопроводе наводятся вихревые токи, вызывающие дополнительные потери мощности и оказывающие размагничивающее действие на магнитопровод.

Эти потери пропорциональны площади, равной разности между площадью динамической и площадью статической петли гистерезиса (см. рис. 10.3).

Потери мощности от вихревых токов рассчитывают по формуле

$$P_v = P_y f^2 B_m^2 G,$$

где P_y — удельные потери мощности от вихревых токов.

Потери мощности в магнитопроводе P_m , выделяясь в виде теплоты, приводят к нагреву катушки индуктивности и магнитопровода, что ведет к снижению КПД соответствующих устройств.

Для уменьшения потерь мощности на гистерезис в качестве материала для магнитопровода используются ферромагнитные металлы, имеющие узкую петлю гистерезиса. Уменьшение потерь мощности на вихревые токи достигается применением для магнитопровода металлов с большим удельным электрическим сопротивлением, это достигается за счет повышенного содержания кремния в металле. При этом магнитопровод набирается из тонких электрически изолированных друг от друга пластин, что способствует уменьшению наводимых в каждой пластине вихревых токов, а следовательно, и снижению потерь мощности от этих токов.

Синусоидальное напряжение $u = U_m \sin \omega t$, подводимое к катушке с ферромагнитным магнитопроводом, компенсируется его составляющими в соответствии с уравнением, записанным по второму закону Кирхгофа в комплексной (векторной) форме:

$$\dot{U} = R\dot{I}_0 + jX\dot{I}_0 + \dot{E} = R\dot{I}_0 + jX\dot{I}_0 + R_0\dot{I}_0 + jX_0\dot{I}_0,$$

где E — ЭДС, обусловленная основным магнитным потоком Φ ; I_0 — ток катушки; R — активное сопротивление проводов катушки; $X = \omega L$ — индуктивное сопротивление катушки ($\omega = 2\pi f$, где f — частота питающего напряжения), обусловленное потоком рассеяния Φ_σ ; $R_0 = P_m/I^2$ — активное сопротивление, обусловленное потерями мощности в магнитопроводе; X_0 — индуктивное сопротивление, обусловленное основным магнитным потоком Φ .

На основе полученного уравнения на рис. 10.4 представлена схема замещения реальной катушки индуктивности с магнитопроводом и учетом действия всех потерь мощности.

Пренебрегая влиянием относительно небольших соп-

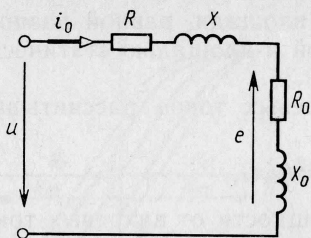


Рис. 10.4

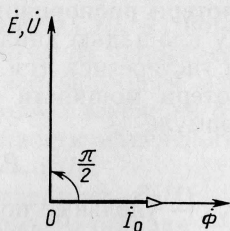


Рис. 10.5

противлений R и X катушки и потерями мощности в магнитопроводе, имеем $\dot{U} = \dot{E}$ и соответственно $U = E = 4,44f\omega\Phi_m$.

Подводимое к катушке напряжение $u = e = U_m \sin \omega t$ в каждое мгновение полностью компенсируется ЭДС, обусловленной основным магнитным потоком катушки индуктивности. Из полученного выражения следует, что максимальное значение магнитного потока катушки определяется действующим значением синусоидального напряжения, подводимого к катушке, его частотой и числом витков катушки:

$$\Phi_m = \frac{U}{4,44f\omega} = B_m s.$$

Так как напряжение изменяется по синусоидальному закону $u = U_m \sin \omega t$ и в данном случае $u = e$, т. е. $e = U_m \sin \omega t = E_m \sin \omega t$ и, следовательно ЭДС и напряжение имеют одинаковую начальную фазу, векторы \dot{U} и \dot{E} на векторной диаграмме идеальной катушки без ферромагнитного сердечника (рис. 10.5) совпадают по фазе.

Полная векторная диаграмма катушки индуктивности с ферромагнитным магнитопроводом согласно уравнению для подводимого напряжения приведена далее. Здесь ток I_0 катушки, опережающий магнитный поток Φ на угол α , разложен на активную составляющую I_a , совпадающую с ЭДС E по фазе, и реактивную составляющую I_p , совпадающую по фазе с магнитным потоком.

ЭДС индукции $e = \pm d\Phi/dt$ изменяется по синусоидальному закону во времени, поэтому магнитный поток, который ее создает, также должен быть синусоидальной функцией времени и, следовательно, его вектор при принятом направлении ЭДС* должен отставать от нее на

* ЭДС индукции при совпадении ее в замкнутом контуре с током записывается со знаком «—». При изменении ее направления — против тока, что в данном случае принято для удобства построения векторной диаграммы, знак ЭДС изменяется на «+».

угол $\pi/2$, т. е. $\Phi = \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2)$, что и показано на векторной диаграмме рис. 10.5.

Как следует из рис. 10.3, зависимость $B(H)$ является нелинейной, а следовательно, будет нелинейной и зависимость $\Phi(I_0)$.

Это означает, что при синусоидальном питающем напряжении $u(t)$, т. е. при синусоидальной зависимости $\Phi(t)$, зависимость между током катушки индуктивности и магнитным потоком $i_0(\Phi)$ также должна быть нелинейной.

С учетом этого на рис. 10.6 приведена зависимость тока $i_0(t)$ при синусоидальном питающем напряжении

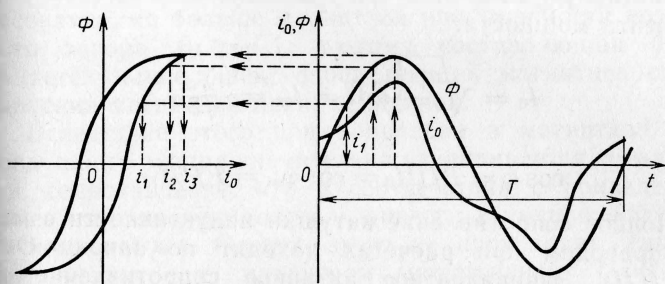


Рис. 10.6

(синусоидальном магнитном потоке), построение которой ясно из рисунка (в левой части приведена циклическая кривая перемагничивания — петля гистерезиса).

Из представленных зависимостей видно, что ток и магнитный поток катушки достигают максимальных значений одновременно, однако их нулевые значения не совпадают по времени, ток достигает этого значения раньше, чем магнитный поток, т. е. магнитный поток отстает по фазе от тока катушки на гистерезисный угол α вследствие явления гистерезиса.

В соответствии с этим и с учетом активного и реактивного падений напряжений на рис. 10.7 представлена векторная диаграмма реальной катушки индуктивности.

Следовательно, при питании синусоидальным напряжением ток в катушке с ферромагнитным сердечником искажает свою форму и является несинусоидальным во времени. При наличии несинусоидальных токов для упрощения расчетов обычно переходят к эквивалентному синусоидальному току $I_{эк}$, имеющему одинаковое с соответствующим несинусоидальным током действующее значение при одинаковой частоте и развивающему одинаковую с

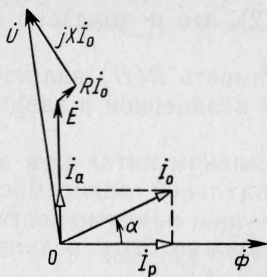


Рис. 10.7

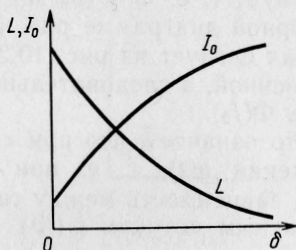


Рис. 10.8

ним активную мощность при одинаковом значении коэффициента мощности:

$$I_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_0^2 dt} = I_{\text{эк}} = \frac{I_{m\text{эк}}}{\sqrt{2}},$$

$$\cos \varphi = P/UI_0 = \cos \varphi_{\text{эк}} = P/UI_{\text{эк}}.$$

Полное сопротивление катушки индуктивности с магнитопроводом при расчетах находят по закону Ома: $Z = U/I_0$. Эквивалентное активное сопротивление $R_{\text{эк}}$ катушки определяется при этом по значению активной мощности P , потребляемой катушкой, и ее току или по значению потерь мощности в магнитопроводе P_m и активному сопротивлению R проводов катушки:

$$R_{\text{эк}} = P/I_0^2 = P_m/I_0^2 + R,$$

Индуктивное эквивалентное сопротивление катушки $X_{\text{эк}} = X + X_0 = \sqrt{Z^2 - R_{\text{эк}}^2}$. При этом индуктивность катушки $L = X/\omega = X/2\pi f$.

В соответствии с законом полного тока для катушки индуктивности, схема которой представлена на рис. 10.2, магнитодвижущая сила

$$F = I_0 \omega = H_1 l_1 + H_2 l_2 + H_3 l_3 + H_b \delta,$$

где H_1, H_2, H_3 — напряженности магнитного поля на участках магнитопровода длиной l_1, l_2, l_3 ; H_b — напряженность поля в воздушном зазоре; δ — величина воздушного зазора.

В общем виде

$$I_0 \omega = \sum_{k=1}^n H_k l_k + H_b \delta.$$

Принимая во внимание, что $B = \mu H$, а $\Phi = Bs$, полученное выражение можно записать относительно магнитного потока в виде закона Ома для магнитной цепи:

$$\Phi = I_0 \omega / \left(\sum_{k=1}^n \frac{l_k}{\mu_k s_k} + \frac{\delta}{\mu_0 s_0} \right) = F / R_m,$$

где R_m — магнитное сопротивление магнитной цепи; μ_k — магнитная проницаемость, соответствующая напряженности магнитного поля H_k участка магнитопровода длиной l_k ; s_0 — сечение магнитопровода в воздушном зазоре.

Магнитная проницаемость материала магнитопровода несоизмеримо больше магнитной проницаемости воздушного зазора ($\mu \gg \mu_0$), поэтому составляющая $\delta / \mu_0 s_0$ является наибольшей, определяющей магнитное сопротивление магнитной цепи, величиной.

Вследствие этого при появлении в магнитной цепи воздушного зазора значительно увеличивается ее магнитное сопротивление, что в соответствии с приведенным ранее выражением должно привести к уменьшению магнитного потока. Однако этого не происходит, так как при неизменном питающем напряжении $U = E = 4,44 f \omega \Phi_m = \text{const}$ магнитный поток должен оставаться неизменным за счет возрастания магнитодвижущей силы F , а следовательно, возрастания тока катушки индуктивности до значения, при котором сохраняется постоянство отношения F / R_m в выражении для магнитного потока Φ .

Катушки индуктивности с магнитопроводом, имеющим регулируемый воздушный зазор (дрессели), используются в качестве регулируемых сопротивлений в цепях переменного тока. Это связано с тем, что с увеличением воздушного зазора при неизменном действующем напряжении магнитное сопротивление магнитопровода и ток дросселя возрастают за счет уменьшения полного сопротивления катушки вследствие уменьшения ее реактивного сопротивления в результате уменьшения индуктивности.

Характер изменения индуктивности и тока катушки с изменением воздушного зазора в цепи магнитопровода показан на рис. 10.8. Путем изменения величины воздушного зазора в магнитопроводе можно регулировать ток катушки индуктивности (дресселя) при включении ее в цепь переменного тока при неизменном подводимом напряжении.

Задания по работе

1. Произвести экспериментальные исследования катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником с регулируемым воздушным зазором при питании от источника постоянного и переменного напряжений.

2. По экспериментальным данным построить вольт-амперные характеристики и зависимости тока от воздушного зазора магнитопровода и рассчитать параметры катушки индуктивности.

3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с приборами и оборудованием, используемым при выполнении исследований. Занести в отчет по лабораторной работе технические данные исследуемой катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником.

2. Снять вольт-амперные характеристики катушки индуктивности при трех различных воздушных зазорах магнитопровода ($\delta = 0; 3$ и 5 мм) и питании ее от источника постоянного напряжения:

а) собрать по монтажной схеме рис. 10.9 электриче-

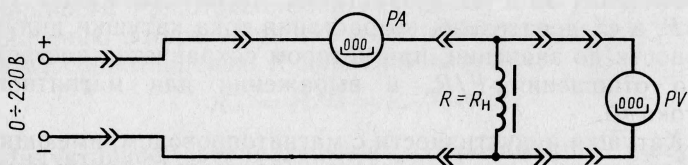


Рис. 10.9

скую цепь и подключить ее к регулируемому источнику питания постоянным током;

б) установить заданный воздушный зазор магнитопровода и, изменяя напряжение на входе цепи от нулевого значения до значения, при котором ток в катушке станет равным номинальному, записать измеренные значения тока и напряжения в табл. 10.1;

в) снизить питающее напряжение на катушке индуктивности до нуля во избежание межвиткового замыкания, отключить катушку от источника постоянного напряжения и размагнитить магнитопровод.

Размагничивание магнитопровода проводится включением катушки на регулируемое синусоидальное напря-

Т а б л и ц а 10.1

Номера опытов	Воздушный зазор, мм	Измеряемые величины, их единицы измерения	Номера измерений				
			1	2	3	4	5
1	0	U , В					
		I_0 , мА					
2	3	U , В					
		I_0 , мА					
3	5	U , В					
		I_0 , мА					

жение, значение которого необходимо плавно изменять от нулевого до номинального и обратно, несколько раз. *Перед операцией размагничивания* магнитопровода катушки необходимо *отключить вольтметр и зашунтировать амперметр*, используемые при измерении напряжения и тока катушки. Синусоидальное напряжение при этом контролируется по вольтметру источника регулируемого переменного напряжения.

3. Снять вольт-амперные характеристики катушки индуктивности при других, указанных в п. 2, воздушных зазорах магнитопровода катушки, полученные результаты занести в табл. 10.1.

4. Снять вольт-амперные характеристики катушки с ферромагнитным сердечником для трех значений воздушного зазора магнитопровода ($\delta = 0$; 3 и 5 мм) при питании от источника переменного напряжения:

а) собрать по монтажной схеме рис. 10.10 электрическую цепь и подключить ее к регулируемому источнику синусоидального напряжения; измерения тока, напряжения и потребляемой катушкой мощности произвести с

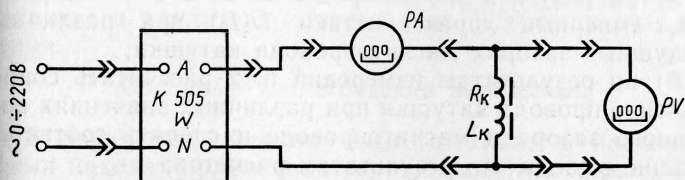


Рис. 10.10

помощью цифрового амперметра, цифрового вольтметра и ваттметра измерительного комплекта К505;

б) установить заданный воздушный зазор магнитопровода катушки и, плавно изменяя напряжение на ее зажимах, примерно через 50 В от нуля, до значения, превышающего номинальное на 10—15 %, включая номинальное напряжение 220 В, записать показания всех измерительных приборов в табл. 10.2. Аналогичные измерения произвести для двух других значений воздушного зазора магнитопровода и записать их в табл. 10.2.

Т а б л и ц а 10.2

Номера опытов	Воздушный зазор, мм	Измеряемые значения величин и их единицы измерения	Номера измерений							
			1	2	3	4	5	6	7	
1	0	U , В								
		I_0 , мА								
		P , Вт								
2	3	U , В								
		I_0 , мА								
		P , Вт								
3	5	U , В								
		I_0 , мА								
		P , Вт								

5. Получить кривую тока катушки с магнитопроводом на экране осциллографа при питании ее синусоидальным напряжением, включив в цепь тока соответствующий шунт. Зарисовать на кальку осциллограммы тока при трех значениях напряжения на зажимах катушки.

6. Обработка результатов измерений:

а) по результатам измерений п. 2, 3 и 4 построить вольт-амперные характеристики $U(I_0)$ при различных воздушных зазорах магнитопровода катушки;

б) по результатам измерений п. 2 рассчитать сопротивление провода катушки при различных значениях воздушного зазора в магнитопроводе и сделать соответствующие выводы, по результатам расчетов;

в) по результатам измерений п. 4 построить зависи-

мость тока катушки от воздушного зазора магнитопровода при номинальном напряжении на зажимах катушки, т. е. $I_0(\delta)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$;

г) по результатам измерений п. 4 рассчитать полное сопротивление катушки при номинальном напряжении и различных воздушных зазорах магнитопровода; построить зависимость $Z(I_0)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$;

д) по заданным преподавателем значениям воздушного зазора в магнитопроводе и напряжениям рассчитать параметры схемы замещения и эквивалентную индуктивность катушки.

Контрольные вопросы

1. Объясните назначение магнитопровода катушки индуктивности.
2. Поясните влияние магнитопровода на значение индуктивности катушки.
3. Как изменится вольт-амперная характеристика катушки индуктивности при увеличении воздушного зазора магнитопровода при питании от сети постоянного и от сети переменного тока?
4. Укажите, как изменится вольт-амперная характеристика катушки индуктивности при увеличении частоты питающего напряжения.
5. Поясните влияние сечения магнитопровода на значение индуктивности катушки.
6. Укажите причину изготовления магнитопровода катушки индуктивности из отдельных изолированных друг от друга листов электротехнической стали.
7. В каком случае применяется сплошной магнитопровод катушки индуктивности?
8. Поясните структуру потерь мощности катушки индуктивности при питании постоянным и переменным токами.
9. Объясните причину искажения синусоидальной формы тока при питании катушки индуктивности синусоидальным напряжением.
10. Приведите формулы для определения параметров схемы замещения катушки индуктивности с магнитопроводом.

Лабораторная работа 11

Однофазный магнитный усилитель

Цель работы. Ознакомление с устройством и принципом работы магнитного усилителя, снятие вольт-амперных характеристик и характеристики управления магнитного усилителя, определение коэффициента усиления.

Основные теоретические положения

В различных областях электротехники в настоящее время находят применение управляемые дроссели и магнитные усилители.

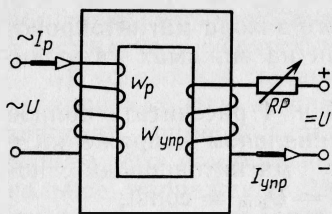


Рис. 11.1

Управляемый дроссель представляет собой катушку индуктивности с магнитопроводом (сердечником), характеризующуюся переменным индуктивным сопротивлением, обусловленным подмагничиванием ферромагнитного сердечника

постоянным током. Так же как и катушка индуктивности с магнитопроводом, управляемый дроссель вследствие нелинейной зависимости между магнитным потоком и током имеет нелинейную зависимость между индуктивностью и током $L(I)$, а следовательно, между индуктивным сопротивлением и током катушки $X_L(I)$. Вследствие этого ток в рабочей обмотке дросселя представляется возможным изменять путем изменения магнитной проницаемости ферромагнитного материала магнитопровода, подвергая его одновременному воздействию переменной и постоянной магнитодвижущих сил.

В дросселях с подмагничиванием (рис. 11.1) постоянная магнитодвижущая сила создается постоянным током подмагничивания в витках $w_{уп}$ его обмотки управления, расположенной на том же сердечнике, что и основная — рабочая — обмотка w_p .

При изменении значения постоянного тока $I_{уп}$ обмотки управления изменяется магнитное состояние сердечника дросселя, а следовательно, значение индуктивности рабочей обмотки и тока I_p в ней. На рис. 11.2 приведена кривая намагничивания $B(H)$ для дросселя при условии пренебрежения потоками рассеяния и потерями мощности в ферромагнитном сердечнике. При неизменном значении переменной составляющей магнитной индукции B_{\sim} магнитного поля, определяемой значением приложенного к рабочей обмотке дросселя переменного напряжения U , с ростом постоянной составляющей $B_{=}$ магнитной индукции возрастает несимметрия зависимостей $H_{\sim}(t)$ вследствие уменьшения магнитной проницаемости μ ферромагнитного материала сердечника дросселя, так как $\mu = B/H$. Это приводит к уменьшению индуктивности рабочей обмотки $L = \mu w_p^2 s / l$ (где s — площадь поперечного сечения и l — средняя длина магнитной линии сердечника), индуктивного и полного сопротивлений, а следовательно, к увеличению тока дросселя при той же величине приложенного напряжения. Семейство вольт-

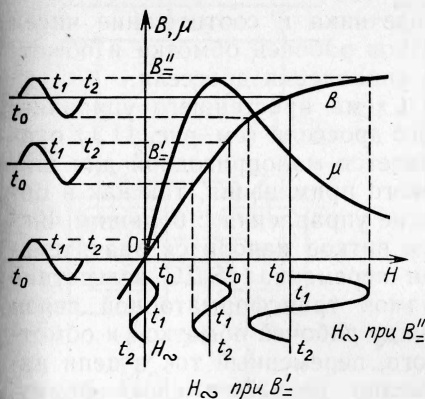


Рис. 11.2

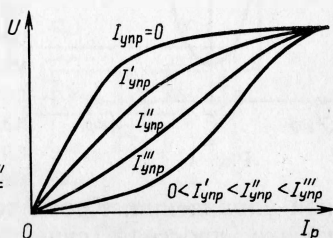


Рис. 11.3

амперных характеристик $U(I_p)$ дросселя с подмагничиванием, полученных при разных значениях тока подмагничивания I_{ynp} , представлены на рис. 11.3. Из рисунка следует, что при заданном приложенном к рабочей обмотке дросселя напряжении с увеличением небольшого по значению тока подмагничивания ток в рабочей обмотке дросселя значительно возрастает. Таким образом, при подмагничивании магнитопровода дросселя постоянным током вследствие изменения его магнитного состояния уменьшается индуктивность рабочей обмотки и возрастает ток дросселя.

При этом при включении в цепь рабочей обмотки потребителя электроэнергии (нагрузки) с сопротивлением R_n при незначительных затратах мощности в цепи обмотки управления, обусловленной током I_{ynp} дросселя с подмагничиванием, представляется возможным управлять значительной мощностью потребителя электроэнергии с рабочим током I_p , что следует из характеристики управления $I_p(I_y)$ (рис. 11.4) дросселя. Вследствие того что индуктивность рабочей обмотки дросселя зависит только от абсолютного значения подмагничивающего тока и не зависит от его полярности, характеристика управления (усиления) дросселя $I_p(I_{ynp})$ оказывается симметричной относительно оси ординат (рис. 11.4).

При токе управления $I_{ynp} = 0$ индуктивное сопротивление рабочей обмотки имеет максимальное, а ток в ней минимальное значение I_{po} . Следует заметить, что на вид характеристики управления дросселя влияет также напряжение, приложенное к рабочей обмотке, материал

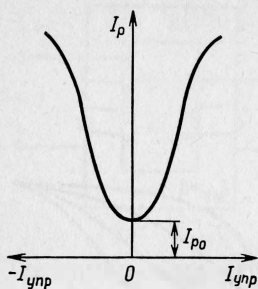


Рис. 11.4

сердечника и соотношение чисел витков рабочей обмотки и обмотки управления дросселя.

Схема простейшего управляемого дросселя (см. рис. 11.1) оказывается малопримодной для широкого применения, так как в обмотке управления с большим числом витков наводится значительная переменная ЭДС вследствие прямой трансформаторной связи между рабочей обмоткой и обмот-

кой управления. Кроме того, переменный ток в цепи нагрузки дросселя существенно искажает свою форму. Поэтому при создании магнитных усилителей используются конструкции, основанные на двух О-образных сердечниках (рис. 11.5, а) или на одном Ш-образном сердечнике (рис. 11.5, б), лишенные указанных недостатков.

В связи с тем что с помощью управляемого дросселя с подмагничиванием можно, затрачивая незначительную мощность в цепи управления, управлять значительной мощностью в рабочей цепи, представляется возможным использовать его в качестве усилителей тока, напряжения и мощности. Усилители, действие которых основано на том же принципе, что и дросселей с подмагничиванием, являются магнитными усилителями.

С учетом этого к простейшим магнитным усилителям можно отнести управляемый дроссель (см. рис. 11.1). Однако из-за существенных недостатков (прямая трансформаторная связь входной и выходной цепей, значительные искажения формы выходного тока) эта схема широкого практического применения в качестве усилителя не получила. Поэтому в основу магнитных усилителей на практике положены схемы, приведенные на рис. 11.5.

Включение рабочей обмотки и обмотки управления при выполнении магнитного усилителя по схеме рис. 11.5, а производится с таким расчетом, чтобы переменная и постоянная составляющие магнитного потока в одном из сердечников совпадали по направлению, а в другом имели противоположное направление. При этом форма тока в рабочих обмотках улучшается, так как в этом случае переменная ЭДС в обмотке постоянного тока не будет наводиться. Аналогично происходит устранение отмеченных недостатков и при использовании схемы рис. 11.5, б.

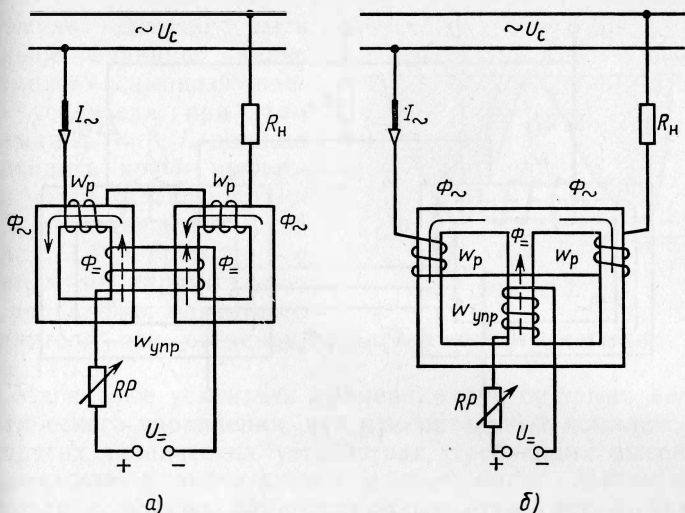


Рис. 11.5

У магнитных усилителей в соответствии с назначением различают обмотки постоянного тока: управления, смещения и обратной связи. Как ламповые и полупроводниковые усилители, магнитные усилители характеризуются коэффициентами усиления по току, напряжению и мощности:

$$K_I = \Delta I_p / \Delta I_{упр}; K_U = \Delta U_p / \Delta U_{упр} \text{ и } K_P = \Delta P_p / \Delta P_{упр},$$

где ΔI_p , ΔU_p и ΔP_p — изменения тока, напряжения и мощности в рабочей цепи магнитного усилителя, соответствующие изменению тока управления на значение $\Delta I_{упр}$ при изменении напряжения управления на $\Delta U_{упр}$. Значения $\Delta U_{упр}$ и $\Delta P_{упр}$ могут быть выражены через изменение тока управления: $\Delta U_{упр} = \Delta I_{упр} R_{упр}$ и $\Delta P_{упр} = \Delta I_{упр} \Delta U_{упр}$, где $R_{упр}$ — сопротивление цепи управления.

Для увеличения коэффициентов усиления магнитные усилители обычно выполняются с положительными обратными внешними или внутренними связями. Наибольшее применение получили магнитные усилители с внутренними обратными связями, в которых в качестве обмотки обратной связи используется рабочая обмотка. Поэтому при одной и той же выходной мощности они имеют более простое конструктивное исполнение, меньшие габариты и массу.

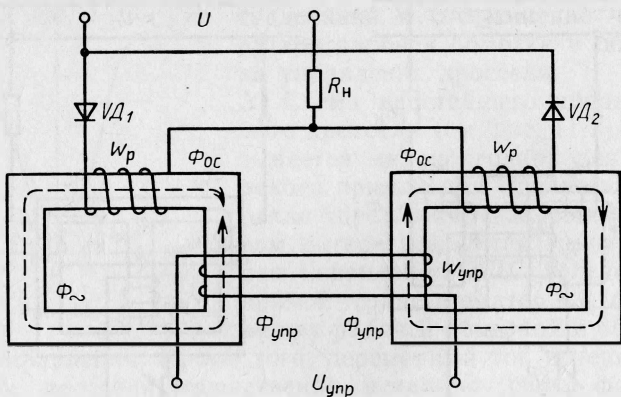


Рис. 11.6

На рис. 11.6 приведена схема магнитного усилителя с внутренней положительной обратной связью (с самоподмагничиванием).

В этой схеме в цепь рабочей обмотки усилителя включены полупроводниковые диоды VD_1 и VD_2 , вследствие чего по каждой половине рабочей обмотки поочередно протекают подмагничивающие токи обратной связи $I_{ос}$, пропорциональные току нагрузки.

Пользуясь характеристикой управления (см. рис. 11.4) для магнитного усилителя без обратной связи, ток нагрузки можно записать в следующем виде: $I_n = I_p = I_{po} + K_I I_{фс}$.

Так как ток нагрузки $I_n = I_{po}$ при токе управления $I_{фс} = 0$ относительно мал, им можно пренебречь и считать, что $I_n = I_p = K_I I_{фс}$.

Из этого выражения можно определить коэффициент усиления по току усилителя без обратной связи: $K_I = I_n / I_{фс} = I_p / I_n$.

Представляя приведенный к числу витков обмотки управления ток обратной связи $I'_{ос} = \beta_{ос} I_n$ через ток нагрузки I_n и коэффициент цепи обратной связи $\beta_{ос}$, можно записать выражение для коэффициента усиления по току магнитного усилителя с положительной обратной связью (так же как для ламповых и полупроводниковых усилителей):

$$K_{ос} = K_I / (1 - K_I \beta_{ос}).$$

Из этого выражения следует, что произведение $K_I \beta_{ос}$ в

формуле должно быть меньше единицы, иначе возможно самовозбуждение усилителя, при этом прямая $I'_{oc} = \beta_{oc} I_n$ должна проходить круче начальной части характеристики $I_p(I_{упр})$ без обратной связи (рис. 11.7). Графическое построение характеристики управления магнитного усилителя при введении обратной связи показано на рис. 11.7.

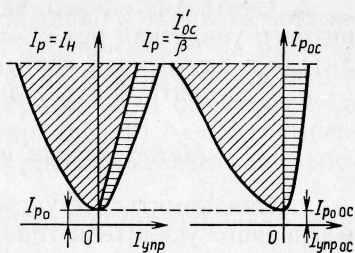


Рис. 11.7

Магнитные усилители применяются в системах автоматического управления, для измерительных комплексов, в других технических устройствах, требующих высокой надежности и значительной долговечности. Магнитные усилители, однако, характеризуются относительно большой инерционностью из-за влияния индуктивности обмоток управления и обмоток обратной связи.

Введение положительной обратной связи вызывает увеличение начального тока I_{po} нагрузки при отсутствии управляющего тока. При этом характеристика управления магнитного усилителя становится резко несимметричной, крутизна ее возрастает по сравнению с той же характеристикой без обратной связи.

Рассмотренные магнитные (дрессельные) усилители имеют общий, ограничивающий область их применения, недостаток. Они не позволяют менять фазы выходного тока при изменении фазы тока управления. Поэтому дроссельные магнитные усилители в настоящее время применяются главным образом для неререверсированной нагрузки, в частности, нагревательных и осветительных приборов и др. При необходимости обеспечения возможности изменения фазы выходного сигнала применяются дифференциальные схемы включения дроссельных и двухтактных магнитных усилителей.

Задание по работе

1. Ознакомиться с конструкцией однофазного магнитного усилителя и схемой его включения.
2. Снять и построить семейство вольт-амперных характеристик при различных токах управления магнитного усилителя.

3. Снять и построить характеристики управления магнитного усилителя без обратной связи и магнитного усилителя с внутренней обратной связью.

4. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по работе

1. Ознакомиться с устройством и схемами включения магнитного усилителя типа ТУМ-15. Записать в отчет по лабораторной работе номинальные данные магнитного усилителя:

Тип усилителя	ТУМ-15
Номинальное напряжение питания рабочих обмоток, В	127
Номинальный ток рабочих обмоток, А	0,55
Номинальный ток обмотки управления, мА	6,5
Номинальная частота напряжения, Гц	50
Сопrotивление нагрузки, Ом	150
Сопrotивление обмотки управления, Ом	43

2. Снять вольт-амперные характеристики магнитного усилителя $U(I_p)$ при $I_{упр} = \text{const}$ при работе его в режиме дросселя с подмагничиванием:

а) собрать электрическую цепь, принципиальная схема которой показана на рис. 11.8, а монтажная схема — на рис. 11.9;

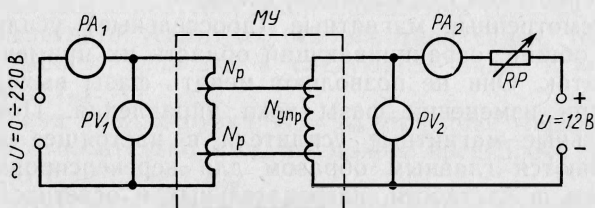


Рис. 11.8

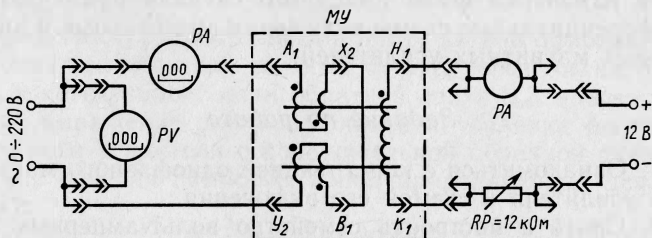


Рис. 11.9

б) включить цепь под напряжение и записать показания приборов; измерение тока и напряжения на рабочих обмотках производится цифровыми амперметром и вольтметром, измерение тока и напряжения в обмотках подмагничивания (обмотках управления) — миллиамперметром и милливольтметром, расположенным на рабочей панели стенда;

в) установить ток в обмотке подмагничивания равным номинальному $I_{упр} = I_{упр\text{ном}}$;

г) плавно изменяя напряжение U на рабочих обмотках, снять показания всех приборов при различных значениях тока в цепи рабочих обмоток магнитного усилителя и занести их в табл. 11.1;

Таблица 11.1

$I_{упр}, \text{ мА}$		Номера измерений						
		1	2	3	4	5	6	7
$I_{упр} = 6,5$	$U, \text{ В}$							
...	$I_p, \text{ А}$							

Примечания: 1. Ток и напряжение в цепи рабочих обмоток в процессе проведения опытов не должны превышать их номинальных значений. 2. Отключение цепей источников питания необходимо производить после снижения напряжения до нуля.

д) повторить опыт при токах подмагничивания $I_{упр} = 0,5I_{упр\text{ном}}$ и $I_{упр} = 0$.

3. Снять характеристику управления $I_p(I_{упр})$ магнитного усилителя:

а) произвести изменения в монтажной схеме рис. 11.9 согласно схеме рис. 11.10;

б) установить ток в обмотке управления, напряжение и ток на входе рабочей цепи усилителя равными номинальным их значениям;

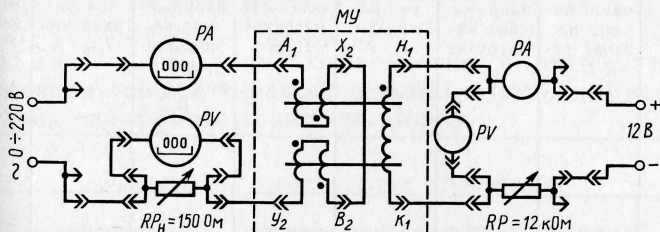


Рис. 11.10

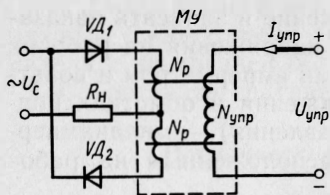


Рис. 11.11

в) изменяя ток в обмотке управления от номинального значения до нуля (через 1 мА), записать показания всех приборов в табл. 11.2. В процессе опыта не изменять сопротивление нагрузки и поддерживать неизменным входное напряжение рабочей цепи;

г) снизить до нуля напряжения на рабочей и управляющей обмотках и отключить от сети источники питания.

4. Собрать магнитный усилитель с самоподмагничиванием, принципиальная схема которого приведена на рис. 11.11, в соответствии с рис. 11.12.

5. Снять характеристику управления $I_p(I_{упр})$ магнитного усилителя с самоподмагничиванием, т. е. усилителя с внутренней обратной связью, по методике, изложенной в п. 3. Результаты измерений записать в табл. 11.2.

6. Обработка результатов измерений:

а) по результатам измерений п. 2 построить в одной системе координат вольт-амперные характеристики усилителя при различных значениях токов подмагничивания;

б) по результатам измерений п. 3 построить характеристику управления $I_p(I_{упр})$ и определить по ней коэффициенты усиления тока, напряжения и мощности;

в) по результатам измерений п. 5 построить характеристику управления $I_p(I_{упр})$ и определить коэффициенты усиления тока, напряжения и мощности магнитного усилителя с самоподмагничиванием.

Таблица 11.2

Номера измерений	Рабочая цепь				Цепь управления		
	напряжение на входе цепи U , В	напряжение на нагрузке U_n , В	ток нагрузки I_p , А	мощность нагрузки P_n , Вт	напряжение на обмотке управления $U_{упр}$, В	ток управления $I_{упр}$, А	мощность $P_{упр}$, Вт
1							
2							
...							

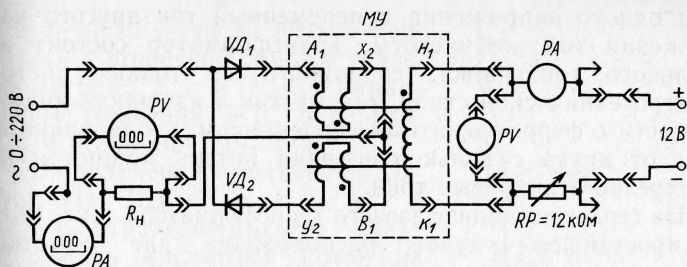


Рис. 11.12

Контрольные вопросы

1. Объясните, в чем состоит отличие дросселя с подмагничиванием от катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником.
2. Поясните, как включаются рабочие обмотки дросселя с подмагничиванием, имеющего трехстержневой магнитопровод для устранения возможности наведения ЭДС в обмотке управления.
3. Приведите выражение для индуктивности катушки с ферромагнитным сердечником.
4. Нарисуйте семейство вольт-амперных характеристик управляемого дросселя с подмагничиванием.
5. Укажите область применения магнитных усилителей.
6. Дайте определение коэффициентов усиления магнитного усилителя по току, напряжению и мощности.
7. Как изменится характеристика усиления магнитного усилителя с уменьшением рабочего напряжения?
8. Объясните, почему характеристика управления дроссельного магнитного усилителя симметрична относительно оси ординат.
9. Укажите, какие обратные связи нашли применение в магнитных усилителях.
10. Объясните влияние положительной обратной связи на усиительные свойства магнитного усилителя.

Лабораторная работа 12

Однофазный трансформатор

Цель работы. Ознакомление с устройством, принципом работы, характеристиками и методами исследования однофазных трансформаторов.

Основные теоретические положения

Трансформатор — статический электромагнитный аппарат, предназначен для преобразования переменного

тока одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Трансформатор состоит из стального сердечника, собранного из тонких листов электротехнической стали, так же как в катушках индуктивности с ферромагнитным сердечником, изолированных друг от друга с целью снижения потерь мощности на гистерезис и вихревые токи.

На сердечнике однофазового трансформатора (рис. 12.1) в простейшем случае расположены две обмотки, выполненные из изолированного провода. К первичной об-

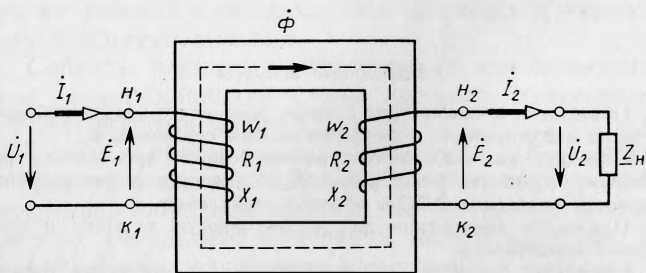


Рис. 12.1

мотке подводится питающее напряжение U_1 . Со вторичной его обмотки снимается напряжение U_2 , которое подводится к потребителю электрической энергии.

Во многих случаях трансформатор имеет не одну, а две или несколько вторичных обмоток, к каждой из которых подключается свой потребитель электроэнергии.

Переменный ток, проходя по виткам первичной обмотки трансформатора, возбуждает в сердечнике магнитопровода переменный магнитный поток Φ . Изменяясь во времени по синусоидальному закону $\Phi = \Phi_m \sin \omega t$, этот поток пронизывает витки как первичной, так и вторичной обмоток трансформатора. При этом в соответствии с законом электромагнитной индукции в обмотках будут наводиться ЭДС, мгновенные значения которых соответственно для первичной и вторичной обмоток можно записать в следующем виде:

$$e_1 = w_1 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m1} \sin(\omega t + \pi/2),$$

$$e_2 = w_2 \frac{d\Phi}{dt} = E_{m2} \sin(\omega t + \pi/2),$$

где ω_1 и ω_2 — число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора; E_{m1} и E_{m2} — амплитудные значения ЭДС в первичной и вторичной обмотках.

Из полученных уравнений следует, что ЭДС E_1 , так же как и ЭДС E_2 трансформатора, будут опережать магнитный поток на угол $\pi/2$.

Ток первичной обмотки трансформатора при отключенном потребителе электроэнергии является его током холостого хода. Пренебрегая влиянием насыщения, несинусоидальный намагничивающий ток можно заменить эквивалентным синусоидальным: $i_0 = I_{m0} \sin(\omega t + \alpha)$.

Входящий в уравнение угол магнитных потерь α (угол сдвига по фазе между током и магнитным потоком трансформатора) обусловлен потерями мощности в магнитопроводе трансформатора.

Значение угла α для современных электротехнических сталей обычно невелико и составляет порядка $4-6^\circ$.

Значение напряжения, подводимого в режиме холостого хода к трансформатору, в соответствии со вторым законом Кирхгофа для первичной обмотки, так же как и для катушки индуктивности с магнитопроводом, может быть представлено как сумма:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 + R_1 \dot{I}_0 + jX_1 \dot{I}_0,$$

где R_1 — активное сопротивление первичной обмотки; X_1 — индуктивное сопротивление первичной обмотки, обусловленное потоками рассеяния.

Исходя из уравнения электрического равновесия, можно построить векторную диаграмму трансформатора для режима холостого хода (рис. 12.2). При синусоидальном изменении магнитного потока и отсутствии насыщения магнитной системы действующие значения ЭДС, наводимых в первичной и вторичной обмотках трансформатора, определяются по формулам:

$$E_1 = 4,44 \omega_1 f_1 \Phi_m \quad \text{и} \quad E_2 = 4,44 \omega_2 f_1 \Phi_m,$$

где f_1 — частота переменного тока; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока трансформатора; ω_1 и ω_2 —

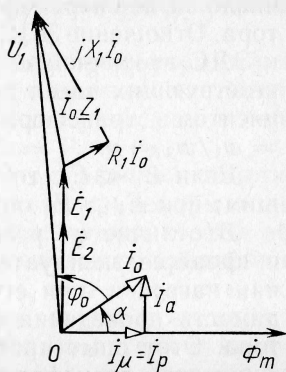


Рис. 12.2

число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора. Отношение ЭДС первичной обмотки трансформатора к ЭДС вторичной его обмотки, равное отношению соответствующих чисел витков обмоток, называется коэффициентом трансформации трансформатора: $E_1/E_2 = w_1/w_2 = n$.

Если $E_1 < E_2$, то трансформатор является повышающим; при $E_1 > E_2$ он будет понижающим.

В отличие от режима холостого хода, возникаемого в процессе эксплуатации трансформатора при отключении нагрузки, при его исследовании появляется необходимость проведения опыта холостого хода трансформатора. Этот опыт проводится в целях определения коэффициента трансформации n , магнитного потока Φ_m , а также потерь мощности P_m в сердечнике магнитопровода трансформатора при номинальном режиме.

При опыте холостого хода к первичной обмотке трансформатора подводится напряжение, равное номинальному его значению $U_{1\text{ном}}$. Вторичная обмотка трансформатора при этом разомкнута, так как в цепи ее отсутствует нагрузка. В результате этого ток во вторичной обмотке оказывается равным нулю ($I_2 = 0$), в то время как в цепи первичной обмотки трансформатора будет ток холостого хода I_0 , значение которого обычно невелико и составляет порядка 4—10 % от номинального значения тока в первичной обмотке $I_{1\text{ном}}$. С увеличением номинальной мощности трансформатора относительное значение тока холостого хода снижается.

Воспользовавшись вторым законом Кирхгофа для первичной и вторичной цепи трансформатора в режиме холостого хода, можно получить следующие уравнения электрического равновесия:

$$\dot{E}_1 = \dot{U}_1 + \dot{I}_0 \underline{Z}_1, \quad \dot{E}_2 = \dot{U}_2.$$

Пренебрегая влиянием падения напряжения на первичной обмотке трансформатора $I_0 Z_1$, равного произведению тока холостого хода на сопротивление первичной обмотки $Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ ввиду его небольшого значения по сравнению с E_1 , коэффициент трансформации приближенно можно определить по показаниям приборов при опыте холостого хода как отношение первичного напряжения ко вторичному напряжению: $n = E_1/E_2 \simeq U_1/U_2$.

Полученное выражение дает возможность вычислить магнитный поток Φ_m , а также магнитную индукцию B_m ,

если известно сечение сердечника магнитопровода s_c , так как $B_m = \Phi_m / s_c$.

Активная мощность, потребляемая трансформатором в режиме холостого хода P_0 , затрачивается на потери мощности в магнитопроводе и электрические потери мощности в первичной обмотке: $P_0 = P_m + P_{\Sigma 1}$.

Так как активное сопротивление первичной обмотки R_1 , так же как и ток холостого хода I_0 трансформатора, обычно незначительно, электрические потери в этой обмотке оказываются небольшими и ими можно пренебречь. В результате этого можно принять, что мощность, потребляемая трансформатором в опыте холостого хода и измеряемая ваттметром, расходуется на потери в магнитопроводе, обусловленные гистерезисом и вихревыми токами: $P_0 = P_m$. При нагрузке трансформатора ко вторичной его обмотке подключается потребитель электрической энергии.

Ток во вторичной обмотке нагруженного трансформатора согласно закону Ома определяется выражением

$$I_2 = U_2 / Z_n,$$

где $Z_n = \sqrt{R_n^2 + X_n^2}$ — полное сопротивление потребителя.

В соответствии со вторым законом Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток нагруженного трансформатора можно записать соответственно следующие уравнения электрического равновесия:

$$\dot{U}_1 = (R_1 + jX_1)\dot{I}_1 + \dot{E}_1, \quad \dot{E}_2 = (R_2 + jX_2)\dot{I}_2 + \dot{U}_2,$$

где I_1 — ток первичной обмотки нагруженного трансформатора; R_2 — активное сопротивление вторичной обмотки; X_2 — индуктивное сопротивление вторичной обмотки, обусловленное потоками рассеяния.

Так как падение напряжения на первичной обмотке трансформатора $I_1 Z_1 = I_1 \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$ в пределах до номинального тока нагрузки обычно мало по сравнению с ЭДС E_1 , можно приближенно считать, что $U_1 \approx E_1 = 4,44 \omega_1 f_1 \Phi_m$.

Из этого следует, что при неизменном напряжении питающей сети $U_1 = \text{const}$ при нагрузке трансформатора ЭДС E_1 можно считать неизменной ($E_1 = \text{const}$). Так как ЭДС наводится результирующим магнитным потоком, то, следовательно, этот поток должен также оставаться практически постоянным в пределах от холостого

хода до номинальной нагрузки трансформатора, т. е. $\Phi_m = \text{const.}$

Исследование работы трансформатора при нагрузке удобно производить на основе векторных диаграмм, построенных для приведенного трансформатора, заменяющего реальный трансформатор, у которого параметры вторичной обмотки приведены к напряжению и числу витков первичной обмотки. В соответствии с этим приведенный трансформатор должен иметь коэффициент трансформации, равный единице ($n = 1$).

В процессе определения параметров вторичной обмотки приведенного трансформатора все параметры первичной его обмотки остаются неизменными. При замене реального трансформатора приведенным трансформатором активные, реактивные и полные мощности, а также коэффициент мощности вторичной обмотки трансформатора должны оставаться постоянными.

Значение вторичной приведенной ЭДС E'_2 можно найти из выражения для коэффициента трансформации: $E_1 = nE_2 = E'_2$. Аналогично можно записать выражение и для вторичного приведенного напряжения трансформатора: $U'_2 = nU_2$.

Значение приведенного вторичного тока I'_2 можно получить из соотношения, записанного из условия сохранения постоянства мощности вторичной обмотки трансформатора:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2.$$

С учетом этого, а также того, что $E'_2 = nE_2$, получаем выражение для приведенного вторичного тока:

$$I'_2 = I_2 / n.$$

Приведенное активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора R'_2 можно определить, исходя из условия постоянства электрических потерь во вторичной обмотке трансформатора в процессе приведения параметров $I'^2_2 R_2 = (I'_2)^2 R'_2$.

С учетом выражения для тока I'_2 получим выражение для приведенного активного сопротивления вторичной обмотки $R'_2 = n^2 R_2$.

Аналогично, исходя из неизменности реактивной и полной мощности вторичной обмотки трансформатора, можно получить выражения для приведенного реактивного индуктивного и приведенного полного сопротивле-

ний вторичной обмотки трансформатора: $X'_2 = n^2 X_2$, $Z'_2 = n^2 Z_2$.

При этом, так же как и для катушки индуктивности с магнитопроводом, ЭДС E_1 , равную E'_2 , можно заменить векторной суммой активного и реактивного индуктивного падений напряжения в соответствии с уравнением

$$\dot{E}_1 = R_0 \dot{I}_0 + jX_0 \dot{I}_0,$$

где X_0 — индуктивное сопротивление, обусловленное основным потоком трансформатора; R_0 — активное сопротивление, обусловленное магнитными потерями мощности в магнитопроводе трансформатора, т. е. некоторое условное активное сопротивление, в котором выделяется мощность $R_0 \dot{I}_0^2$, равная магнитным потерям мощности в магнитопроводе.

С учетом полученных уравнений для \dot{U}_1 и \dot{E}_2 , используя приведенные параметры вторичной обмотки трансформатора, запишем уравнение электрического равновесия для вторичной обмотки $\dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - (R'_2 + jX'_2)\dot{I}'_2$. Принимая во внимание, что $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}'_2$, можно составить схему замещения трансформатора, имеющую вид, представленный на рис. 12.3, а, и построить векторную диаграмму (рис. 12.3 б).

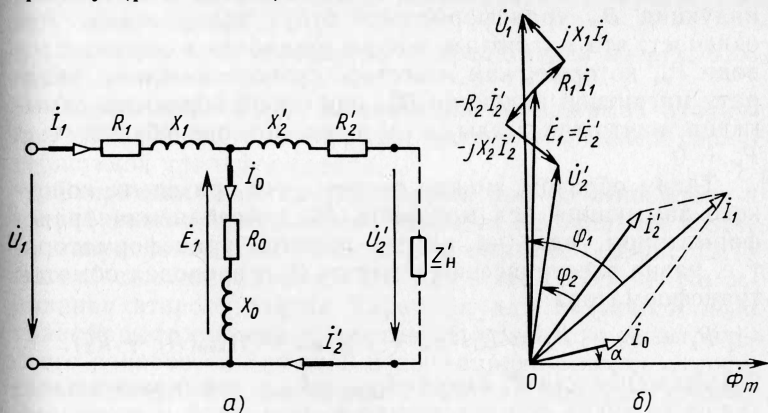


Рис. 12.3

Опыт короткого замыкания трансформатора проводится в процессе исследований трансформатора для определения электрических потерь мощности в проводах обмоток и параметров упрощенной схемы замещения трансформатора. Этот опыт проводится при замкнутой

накоротко вторичной обмотке трансформатора. При этом напряжение на вторичной обмотке равно нулю ($U_2 = 0$).

Замыкание вторичной обмотки трансформатора накоротко в процессе эксплуатации приводит к тому, что при номинальном напряжении, подводимом к первичной обмотке, в обмотках трансформатора возникают весьма значительные токи, которые могут привести к выходу его из строя.

При проведении опыта короткого замыкания трансформатора, в отличие от опасного режима короткого замыкания, возникающего в аварийных условиях самопроизвольно, к первичной обмотке трансформатора подводится такое напряжение, при котором в его обмотках возникают токи, равные соответствующим номинальным их значениям.

Для этого достаточно к первичной обмотке трансформатора подвести напряжение U_1 , сниженное (в зависимости от типа и мощности трансформатора) в 10—20 раз по сравнению с соответствующим номинальным значением напряжения $U_{1\text{ ном}}$. Так как при опыте короткого замыкания напряжение, подводимое к первичной обмотке, мало и равно $U_{1к} \approx E_{1к} = 4,44\omega_1 f_1 \Phi_m$, то магнитный поток трансформатора Φ_m , а следовательно, и магнитная индукция B_m трансформатора будут также малы. Это означает, что магнитные потери мощности в магнитопроводе P_m , которые, как известно, пропорциональны квадрату магнитной индукции B_m^2 , при опыте короткого замыкания ничтожно малы и ими можно пренебречь, т. е. $P_m = 0$.

Таким образом, можно считать, что при опыте короткого замыкания вся мощность P_k , потребляемая трансформатором, идет на нагрев обмоток трансформатора, т. е. равна электрическим потерям P_z в проводах обмоток трансформатора:

$$P_k = P_z + P_m \approx R_1 I_{1\text{ ном}}^2 + R_2 I_{2\text{ ном}}^2 = I_{1\text{ ном}}^2 (R_1 + R_2').$$

В выражение для P_k входят $I_{1\text{ ном}}$ и $I_{2\text{ ном}}$, т. е. номинальные значения токов соответственно в первичной и вторичной обмотках трансформатора, так как опыт короткого замыкания проводится при номинальном значении тока. Поэтому с учетом того, что $P_m = 0$, мощность $P_k = P_{\text{ном}}$, т. е. равна электрическим потерям мощности в обмотках трансформатора при номинальной нагрузке.

В соответствии с изложенным, измерив напряжение, ток и активную мощность при опыте короткого замыка-

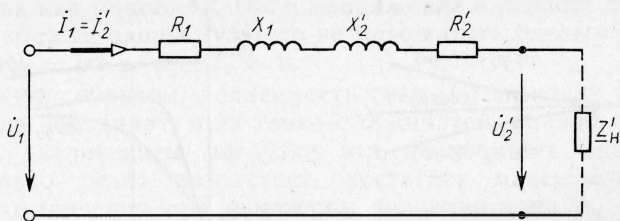


Рис. 12.4

ния ($Z_n = 0$), можно определить параметры упрощенной схемы замещения трансформатора (рис. 12.4) при коротком замыкании:

$$Z_k = U_{1k} / I_{1\text{ном}}, \quad R_k = R_1 + R_2' = P_k / I_{1\text{ном}}^2, \\ X_k = X_1 + X_2' = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2},$$

где R_k , X_k и Z_k — соответственно активное, реактивное индуктивное и полное сопротивления короткого замыкания трансформатора.

К нагрузочным характеристикам трансформатора относятся зависимости вторичного напряжения U_2 , коэффициента мощности $\cos \varphi_1$ и коэффициента полезного действия η от тока нагрузки I_2 потребителя электроэнергии при $\cos \varphi_2 = \text{const}$.

Характер этих зависимостей представлен на рис. 12.5 и 12.6.

Зависимость $U_2(I_2)$ напряжения на зажимах вторичной обмотки от тока нагрузки является внешней характеристикой трансформатора.

Вторичная обмотка трансформатора по отношению к потребителю электроэнергии является источником, поэтому направление тока во вторичной обмотке (см. рис. 12.1) совпадает с направлением ЭДС E_2 в этой обмотке. На основании второго закона Кирхгофа для вторичной цепи трансформатора можно составить уравнение электрического равновесия для этой цепи, записав которое относительно напряжения вторичной обмотки получим уравнение для внешней характеристики трансформатора в векторной форме:

$$\vec{U}_2 = \vec{E}_2 - \underline{Z}_2 \vec{I}_2 = \vec{E}_2 - (R_2 + jX_2) \vec{I}_2.$$

Из полученного выражения следует, что изменение тока нагрузки трансформатора приводит к изменению напряжения на зажимах его вторичной обмотки. Это происходит не только за счет увеличения падения напря-

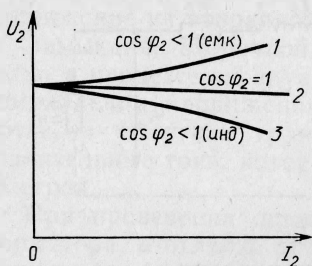


Рис. 12.5

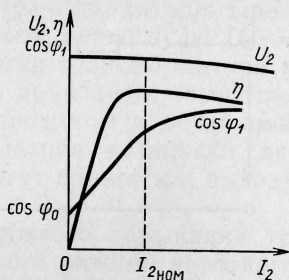


Рис. 12.6

жения на вторичной обмотке, т. е. увеличения произведения $Z_2 I_2$, но также и за счет уменьшения ЭДС E_2 в реальных условиях вследствие некоторого уменьшения магнитного потока при увеличении тока нагрузки трансформатора.

Внешняя характеристика трансформатора при различных характерах нагрузки и $\cos \varphi_2 = \text{const}$ имеет вид, представленный на рис. 12.5. Из векторной диаграммы нагруженного трансформатора можно установить, что падение напряжения на его вторичной обмотке тем больше, чем больше угол сдвига по фазе между ЭДС E_2 и током нагрузки I_2 .

Таким образом, чем больше выражен индуктивный характер нагрузки трансформатора, тем значительно уменьшается напряжение на его вторичной обмотке с ростом тока нагрузки (кривая 3, рис. 12.5). Можно показать, что при чисто активной нагрузке внешняя характеристика трансформатора будет более жесткой (кривая 2, рис. 12.5). При емкостном характере нагрузки с увеличением тока нагрузки происходит возрастание напряжения на зажимах вторичной обмотки трансформатора (кривая 1, рис. 12.5).

На рис. 12.6 представлена внешняя характеристика трансформатора при активно-индуктивном характере нагрузки. Характер изменения коэффициента мощности относительно питающей сети, т. е. $\cos \varphi_1(I_2)$ (рис. 12.6), объясняется следующим образом.

В режиме холостого хода трансформатора, при отсутствии нагрузки во вторичной цепи, трансформатор потребляет активную мощность, равную мощности холостого хода:

$$P_0 = U_{1\text{ном}} I_0 \cos \varphi_0.$$

Так как мощность, ток и напряжение в режиме холостого хода не равны нулю, то не может быть равным нулю и $\cos\varphi_0 = \cos\varphi_1$ при $I_2 = 0$.

Таким образом, зависимость $\cos\varphi_1(I_2)$ выходит не из начала координат, а из точки с ординатой, равной $\cos\varphi_0$.

С увеличением нагрузки эта зависимость сначала довольно резко возрастает, достигает максимального своего значения при некотором значении тока I_2 , а затем несколько уменьшается при дальнейшем увеличении тока нагрузки, что можно видеть из векторной диаграммы нагруженного трансформатора, так как с увеличением тока нагрузки I_2 одновременно происходит увеличение и тока первичной обмотки трансформатора I_1 . Так как коэффициент мощности потребителя $\cos\varphi_2 = \text{const}$, то наряду с увеличением вектора тока \dot{I}_1 , происходит его смещение в сторону вектора \dot{U}_1 . Угол φ_1 при этом уменьшается, а $\cos\varphi_1$ соответственно увеличивается.

Однако возрастание $\cos\varphi_1$ происходит только до определенного предела, равного $\cos\varphi_{1\text{max}}$, так как дальнейшее увеличение I_2 , а следовательно P_2 и I_1 , приводит к значительному возрастанию вектора реактивного падения напряжения на первичной обмотке $jX_1\dot{I}_1$. При этом возрастание угла φ_1 за счет увеличения вектора $jX_1\dot{I}_1$ не может быть скомпенсировано уменьшением этого угла за счет увеличения тока I_1 , так как $\cos\varphi_2 = \text{const}$, ток \dot{I}_1 только в пределах может совпадать с линией вектора тока I_2 , занимающего жестко фиксированное положение на векторной диаграмме относительно вектора ЭДС $\dot{E}_1 = \dot{E}'_2$. В результате этого при дальнейшем увеличении тока нагрузки происходит уменьшение коэффициента мощности $\cos\varphi_1$.

Несколько другой характер имеет зависимость коэффициента полезного действия в функции тока нагрузки $\eta(I_2)$ (см. рис. 12.6). Коэффициент полезного действия трансформатора, как известно, представляет собой отношение полезной мощности к мощности, потребляемой им из сети*:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_s} = \frac{\beta U_2 I_{2\text{ном}} \cos\varphi_2}{\beta U_2 I_{2\text{ном}} \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k},$$

где P_m — потери в магнитопроводе трансформатора (находят из опыта холостого хода); P_s — электрические

* Формула приведена без учета влияния изменения U_2 . При учете его в формулу вводится отношение $\gamma = U_2/U_{2\text{ном}}$.

потери в обмотках трансформатора (определяют при номинальной нагрузке из опыта короткого замыкания); $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ — отношение тока нагрузки к номинальному его значению; $\cos\varphi_2 = P_2/U_2I_2$ — коэффициент мощности потребителя электроэнергии.

При отсутствии нагрузки, когда мощность не потребляется, коэффициент полезного действия оказывается равным нулю, поэтому зависимость $\eta(I_2)$ будет выходить из начала координат.

Из формулы для КПД видно, что при малых значениях нагрузки, когда электрическими потерями мощности P_z в обмотках трансформатора вследствие небольшого значения тока нагрузки можно пренебречь и когда потери мощности в магнитопроводе P_m оказываются соизмеримыми с полезной мощностью P_2 , значение КПД трансформатора оказывается небольшим. С увеличением тока нагрузки КПД трансформатора растет.

Потери мощности в магнитопроводе трансформатора не зависят от нагрузки, в то время как с увеличением нагрузки электрические потери мощности в обмотках трансформатора растут пропорционально квадрату тока.

С учетом этого анализ приведенной формулы показывает, что КПД трансформатора имеет наибольшее значение при равенстве электрических потерь мощности в обмотках и потерь мощности в магнитопроводе трансформатора ($P_z = P_m$).

При дальнейшем возрастании нагрузки трансформатора потерями в магнитопроводе можно пренебречь вследствие их относительно небольшого значения по сравнению с довольно большими электрическими потерями мощности в обмотках трансформатора. Анализ показывает, что при этих условиях КПД трансформатора с увеличением тока нагрузки сверх номинального, хотя и незначительно, будет снижаться, что видно из рис. 12.6.

КПД современных трансформаторов весьма высок. С увеличением номинальной мощности трансформатора КПД растет, причем для мощных трансформаторов он достигает значений порядка 98—99 %.

Задание по работе

1. Ознакомиться с устройством и паспортными данными однофазного трансформатора.
2. Провести опыт холостого хода исследуемого однофазного трансформатора.

3. Осуществить режим нагрузки однофазного трансформатора путем включения в его вторичную цепь переменного активного сопротивления.

4. Провести опыт короткого замыкания однофазного трансформатора.

5. На основании полученных экспериментальных данных произвести определение основных параметров трансформатора и построить его рабочие характеристики.

6. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с приборами, аппаратами и оборудованием стенда, используемыми при выполнении работы, и занести в отчет по лабораторной работе номинальные технические данные исследуемого трансформатора.

2. Провести опыт холостого хода трансформатора:

а) в соответствии с принципиальной схемой рис. 12.7 собрать электрическую цепь для проведения опыта холостого хода трансформатора по монтажной схеме рис. 12.8;

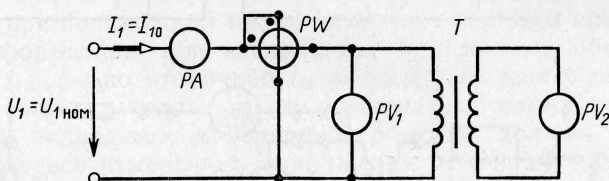


Рис. 12.7

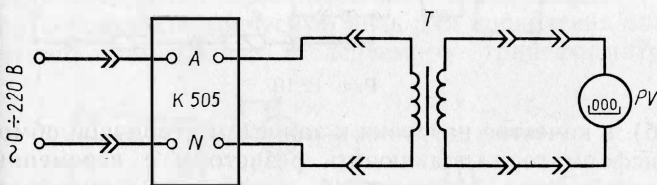


Рис. 12.8

питание электрической цепи осуществлять от регулируемого источника синусоидального напряжения;

б) измерение тока I_0 , мощности P_0 в первичной обмотке трансформатора при холостом ходе производить измерительным комплектом К505, а напряжение на зажимах вторичной обмотки — цифровым вольтметром В7-22А;

в) установить напряжение на первичной обмотке

Измерения				Вычисления					
U_1 , В	U_2 , В	I_0 , А	P_0 , Вт	n	$\cos \varphi_0$	Φ_m , Вб	B_m , Тл	R_0 , Ом	X_0 , Ом

трансформатора равным номинальному и записать показания приборов в табл. 12.1.

3. Провести опыт нагрузки трансформатора:

а) собрать электрическую цепь, принципиальная схема которой для проведения опыта нагрузки исследуемого трансформатора приведена на рис. 12.9; сборку электрической цепи производить в соответствии с монтажной схемой, приведенной на рис. 12.10;

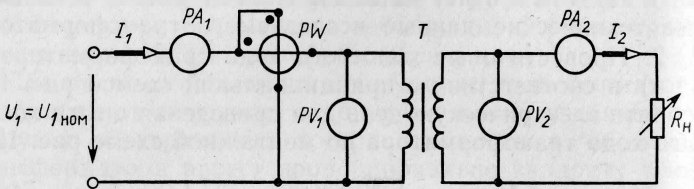


Рис. 12.9

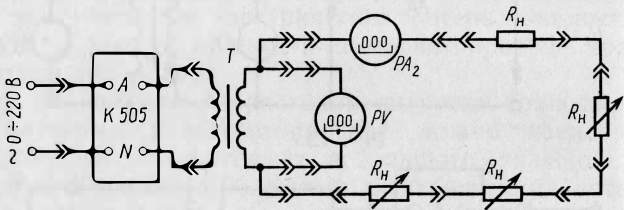


Рис. 12.10

б) в качестве нагрузки к зажимам вторичной обмотки трансформатора подключить резисторы с переменными и постоянными параметрами, суммарное сопротивление которых рассчитать с учетом того, что ток во вторичной обмотке должен изменяться от $I_2 = 0,1 I_{2\text{ном}}$ до $I_2 = (1,2 \div 1,25) I_{2\text{ном}}$;

в) измерение тока I_1 , мощности P_1 и напряжения U_1 первичной обмотки трансформатора производить измерительным комплектом $K 505$, а измерение тока I_2 и напряжения U_2 вторичной обмотки — цифровыми амперметром и вольтметром;

г) установить на первичной обмотке трансформатора номинальное напряжение $U_{1\text{ном}}$ и, изменяя сопротивление

Таблица 12.2

Номера измерений	Измерения						Вычисления			
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	P_2 , Вт	β	γ	η	$\cos\varphi_1$
1										
2										
...										

резисторов во вторичной цепи с переменными параметрами, произвести пять, шесть измерений при различных токах нагрузки в указанном диапазоне его изменений. При проведении опыта напряжение на зажимах первичной обмотки трансформатора поддерживать неизменным. Результаты измерений записать в табл. 12.2.

В таблице: $\beta = I_2/I_{2\text{ном}}$ — коэффициент нагрузки трансформатора; $\gamma = U_2/U_{2\text{ном}}$ — коэффициент изменения напряжения на вторичной обмотке; $P_2 = U_2 I_2 \cos\varphi_2$ — активная мощность потребителя электроэнергии.

4. Опыт короткого замыкания трансформатора произвести при пониженном напряжении на первичной обмотке трансформатора, при котором ток в первичной обмотке $I_{1к} = I_{1\text{ном}}$, а во вторичной $I_{2к} = I_{2\text{ном}}$, т. е. токи в обмотках равны номинальным их значениям. Поэтому напряжение, подводимое к первичной обмотке, должно устанавливаться изменением напряжения источника питания от $U_{1к} = 0$, т. е с нулевого его значения.

Для проведения опыта короткого замыкания:

а) собрать электрическую цепь для проведения опыта короткого замыкания исследуемого трансформатора,

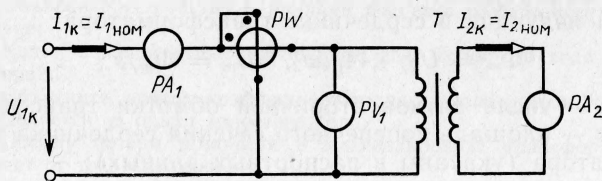


Рис. 12.11

принципиальная схема которой приведена на рис. 12.11, а монтажная — на рис. 12.12;

б) измерения тока $I_{1к}$, мощности P_k и напряжения $U_{1к}$ в первичной обмотке при опыте короткого замыкания трансформатора производятся измерительным комплек-

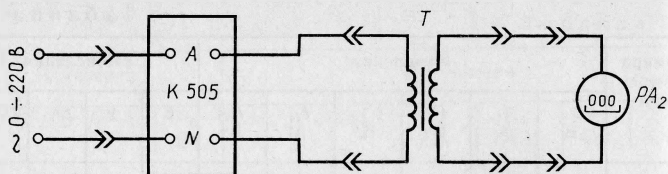


Рис. 12.12

том К505, а измерение тока $I_{2к}$ во вторичной обмотке — цифровым амперметром;

в) плавно изменяя напряжение на первичной обмотке трансформатора от нуля до значения, при котором токи в обмотках достигнут номинальных значений, определяемых по паспортным данным, записать значения измеряемых величин в табл. 12.3.

Т а б л и ц а 12.3

Измерения				Вычисления			
$U_{1к}, В$	$I_{1к}, А$	$I_{2к}, А$	$P_k, Вт$	$\cos\varphi_{1к}$	$R_k, Ом$	$Z_k, Ом$	$X_k, Ом$

5. По результатам измерений, проведенных в опыте холостого хода трансформатора (см. п. 2), определить:

а) коэффициент трансформации трансформатора

$$n = U_1/U_2;$$

б) коэффициент мощности трансформатора при холостом ходе

$$\cos\varphi_0 = P_0/U_1I_0;$$

в) амплитудные значения магнитного потока и магнитной индукции в сердечнике трансформатора

$$\Phi_m = U_2/4,44f_1\omega_2, \quad B_m = \Phi_m/s,$$

где ω_2 — число витков вторичной обмотки трансформатора; s — площадь поперечного сечения сердечника трансформатора (указаны в паспортных данных);

г) параметры намагничивающего контура (пренебрегая падениями напряжений на R_1 и X_1 от тока I_0):

$$R_0 = P_0/I_0^2, \quad Z_0 = U_1/I_0 \text{ и } X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2};$$

д) магнитные потери мощности в магнитопроводе трансформатора

$$P_m \simeq P_0.$$

6. По результатам измерений опыта короткого замыкания (см. п. 4) определить:

а) электрические потери мощности в трансформаторе

$$P_{\text{э ном}} \simeq P_{\text{к}};$$

б) коэффициент мощности трансформатора

$$\cos \varphi_{1\text{к}} = P_{\text{к}} / U_{1\text{к}} I_{1\text{к}};$$

в) параметры схемы замещения трансформатора

$$R_{\text{к}} = R_1 + R'_2 = P_{\text{к}} / I_{1\text{к}}^2, \quad Z_{\text{к}} = U_{1\text{к}} / I_{1\text{к}},$$

$$X_{\text{к}} = X_1 + X'_2 = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2}.$$

7. По результатам измерений опыта нагрузки (см. п. 3) при различных токах нагрузки определить:

а) коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{\beta \gamma S_{2\text{ ном}} \cos \varphi_2}{\beta \gamma S_{2\text{ ном}} \cos \varphi_2 + \gamma^2 P_{\text{м}} + \beta^2 P_{\text{э ном}}};$$

б) коэффициент мощности трансформатора

$$\cos \varphi_1 = P_1 / U_1 I_1.$$

8. По расчетным и измеренным данным испытаний построить в единой координатной системе внешнюю $U_2 I_2$ и рабочие характеристики трансформатора: $I_1(I_2)$, $\eta(I_2)$ и $\cos \varphi_1(I_2)$. Нарисовать схему замещения нагруженного трансформатора с указанием ее элементов.

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение трансформатора.
2. Объясните устройство и принцип действия однофазного трансформатора.
3. Как и с какой целью проводится опыт холостого хода трансформатора?
4. Объясните, почему коэффициент трансформации трансформатора определяется из опыта холостого хода.
5. Почему потери мощности в магнитопроводе трансформатора не зависят от тока нагрузки?
6. Как и с какой целью проводится опыт короткого замыкания трансформатора?
7. Почему при опыте короткого замыкания можно пренебречь потерями мощности в магнитопроводе трансформатора?
8. Почему при изменении тока во вторичной обмотке трансформатора изменяется ток и в первичной его обмотке?
9. Какое влияние оказывает характер нагрузки на внешнюю характеристику трансформатора?
10. Почему с возрастанием тока нагрузки энергетические показатели трансформатора вначале возрастают, а затем снижаются?

Лабораторная работа 13

Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором

Цель работы. Ознакомление с устройством, принципом действия, основными характеристиками и методами испытания асинхронного трехфазного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

Основные теоретические положения

Асинхронные электродвигатели предназначены для преобразования электрической энергии переменного тока в механическую энергию. В зависимости от системы переменного тока асинхронные электродвигатели выполняются трех- или однофазными. В технике наиболее распространены асинхронные трехфазные электродвигатели.

Асинхронный трехфазный электродвигатель состоит из неподвижного статора (рис. 13.1) и вращающегося ротора (рис. 13.2, 13.3). Статор двигателя представляет собой полый цилиндр, собранный из отдельных тонких листов электротехнической стали, изолированных друг от друга с целью уменьшения потерь мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи. В пазах сердечника статора (см. рис. 13.1) уложена трехфазная обмотка статора, выполненная из изолированного провода и состоящая из трех отдельных обмоток фаз, оси которых сдвинуты в пространстве относительно друг друга на угол 120° . Обмотки фаз соединяются между собой звездой или треугольником, в зависимости от значения подводимого напряжения.

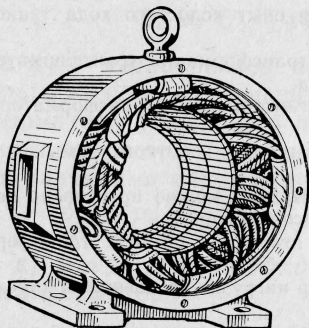


Рис. 13.1

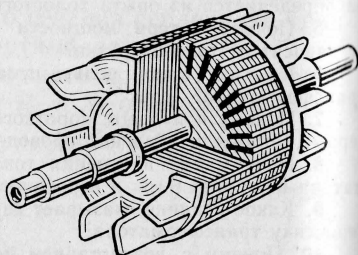


Рис. 13.2

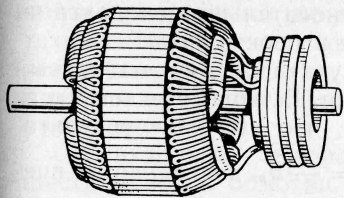


Рис. 13.3

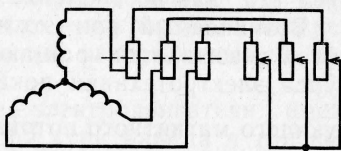


Рис. 13.4

Ротор асинхронного электродвигателя изготовляют в двух исполнениях: короткозамкнутым (см. рис. 13.2) и с контактными кольцами (см. рис. 13.3).

Короткозамкнутый ротор представляет собой ферромагнитный сердечник в виде цилиндра с пазами, в которые уложена обмотка ротора, состоящая из медных или алюминиевых стержней. Эти стержни соединяются между собой торцовыми кольцами и образуют цилиндрическую клетку. В большинстве случаев клетка ротора отливается из алюминия или из сплава на его основе. Для уменьшения потерь мощности в магнитопроводе ротор, так же как и статор, собирают из отдельных изолированных друг от друга листов электротехнической стали.

Ротор с *контактными кольцами* (см. рис. 13.3), называемый иногда также *ф а з н ы м*, имеет трехфазную обмотку, выполненную изолированным проводом, которая в конструктивном отношении мало чем отличается от обмотки статора двигателя. В большинстве случаев обмотка ротора соединяется в звезду. Свободные концы обмотки подводятся к контактным кольцам ротора. В процессе работы контактные кольца скользят по неподвижным щеткам и при этом обеспечивают электрическое соединение обмотки вращающегося ротора с трехфазным неподвижным реостатом, подключенным к щеткам (рис. 13.4).

Такое устройство позволяет изменять активное сопротивление электрической цепи ротора асинхронного двигателя в процессе его вращения, что необходимо для уменьшения значительного пускового тока, возникаемого при пуске, а также для целей регулирования частоты вращения ротора асинхронного двигателя при работе и изменения пускового момента двигателя.

При подаче к трехфазной обмотке статора асинхронного двигателя трехфазного напряжения в каждой его фазе будет создаваться магнитный поток, изменяющийся с частотой питающей сети. При этом потоки отдельных

фаз оказываются сдвинутыми относительно друг друга на угол 120° как во времени, так и в пространстве.

Возникаемый при этом результирующий магнитный поток оказывается вращающимся. В теоретической части курса электротехники показано, что значение результирующего магнитного потока $\Phi = \frac{3}{2}\Phi_m$ постоянно во времени, при этом поток вращается в пространстве с частотой вращения, равной синхронной.

Для изменения направления вращения ротора асинхронного двигателя необходимо изменить направление вращения магнитного поля, т. е. изменить порядок чередования фаз обмотки статора переключением любых двух из трех проводов, питающих двигатель от трехфазной системы напряжений.

Результирующий магнитный поток при своем вращении пересекает проводники обмотки ротора и наводит в них ЭДС. Так как обмотка ротора асинхронного двигателя имеет замкнутую электрическую цепь, в ней возникает ток, который, взаимодействуя с магнитным потоком статора, создает электромагнитный момент двигателя. Под действием этого момента ротор вращается в сторону вращающегося магнитного потока двигателя, причем частота вращения ротора двигателя всегда меньше частоты вращения вращающегося магнитного поля. Если ротор вращается с частотой поля, то его обмотка не пересекается этим полем и в ней не наводится ЭДС. Следовательно, при отсутствии тока в роторе электромагнитный момент двигателя равен нулю. При этом двигатель замедляет свой ход до тех пор, пока в роторе не появится ток, необходимый для обеспечения соответствующего момента, и двигатель продолжает вращаться при этой частоте вращения.

Частота вращения магнитного поля (синхронная частота вращения) находится в строгой зависимости от частоты f_1 подводимого напряжения и числа пар полюсов p двигателя; $n_1 = 60f_1/p$.

Из этого следует, что при принятой в СССР промышленной частоте питающего напряжения ($f_1 = 50$ Гц) наибольшее число оборотов магнитного поля оказывается равным 3000 об/мин при $p = 1$. При увеличении числа пар полюсов частота вращения магнитного поля уменьшается, а следовательно, снижается и частота вращения ротора двигателя. При $p = 2$ $n_1 = 1500$ об/мин и т. д.

Асинхронный электродвигатель характеризуется номи-

нальными данными, на которые он рассчитан. Основные технические данные двигателя указываются в соответствующих каталогах, а также в паспортах, выполненных в виде специальных табличек, закрепленных на корпусах двигателей.

Асинхронные трехфазные электродвигатели имеют шесть выводов обмотки статора (три начала и три конца обмоток фаз). Начала обмоток каждой из трех фаз маркируются C_1, C_2, C_3 , а концы соответственно C_4, C_5, C_6 .

Подобная конструкция обмотки статора дает возможность соединять обмотки фаз двигателя как треугольником, так и звездой. Благодаря этому каждый трехфазный электродвигатель можно использовать при двух различных по значению напряжениях питающей сети (линейном и фазном).

Одним из важнейших показателей, характеризующих работу асинхронного двигателя, является скольжение ротора, под которым понимается отношение

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1},$$

где n_2 — частота вращения ротора электродвигателя, об/мин.

Для большинства современных типов асинхронных электродвигателей скольжение ротора при номинальной нагрузке составляет 2—6 %, а при работе в режиме холостого хода, т. е. когда электродвигатель работает без нагрузки на валу, — доли процента.

При вращении ротора с частотой вращения поля его скольжение оказывается равным нулю ($s = 0$). При частоте вращения ротора, равной нулю, т. е. при неподвижном роторе, скольжение ротора равно единице ($s = 1$).

Разность частот вращения $n_1 - n_2 = sn_1$ представляет собой частоту скольжения, т. е. частоту вращения вращающегося поля статора двигателя относительно его ротора. Нетрудно видеть, что от частоты скольжения, а также от абсолютного значения магнитного потока, характеризующего вращающееся магнитное поле, зависит и значение ЭДС, наводимой в обмотке ротора, а следовательно, ток ротора и его частота:

$$f_{2s} = \frac{pn_1s}{60} = sf_1.$$

При увеличении нагрузки на валу электродвигателя, обусловленной возрастанием момента сопротивления,

частота вращения ротора уменьшается, а скольжение его возрастает. Это вызывает увеличение ЭДС ротора E_{2s} , а следовательно, токов ротора и статора асинхронного двигателя. При этом мощность P_1 , потребляемая из сети, также возрастает.

При неподвижном роторе вращающееся магнитное поле в обмотках статора и ротора асинхронного электродвигателя будет наводить переменные ЭДС, действующие значения которых можно определить по формулам, аналогичным формулам, полученным для ЭДС трансформатора:

$$E_1 = 4,44k_1f_1\omega_1\Phi_m, \quad E_2 = 4,44k_2f_2\omega_2\Phi_m,$$

где E_1 — фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке статора; E_2 — фазное значение ЭДС, наводимой в обмотке ротора при неподвижном его состоянии ($s = 1$; $n_2 = 0$); ω_1 , ω_2 — число витков в фазе статора и ротора; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока фазы асинхронного двигателя; k_1 , k_2 — обмоточные коэффициенты статора и ротора асинхронного двигателя.

В отличие от трансформатора, вследствие конструктивных особенностей асинхронного двигателя, вращающийся магнитный поток не будет одновременно сцеплен со всеми витками обмоток статора и ротора, что учитывается обмоточными коэффициентами k_1 и k_2 , меньшими единицы (у трансформатора $k_1 = k_2 = 1$).

При вращении ротора асинхронного двигателя в процессе работы в нем наводится переменная ЭДС с частотой f_{2s} , значение которой можно найти путем замены в выражении для E_2 частоты $f_2 = f_1$ на f_{2s} :

$$E_2 = 4,44k_2\omega_2f_{2s}\Phi_m = 4,44k_2f_{2s}\omega_2\Phi_m = sE_2.$$

Отсюда следует, что ЭДС вращающегося ротора находят по ЭДС неподвижного ротора, умножая ее значение на скольжение, соответствующее данной частоте вращения ротора электродвигателя.

При работе асинхронного электродвигателя под действием ЭДС E_{2s} , возникающей во вращающемся роторе, в цепи обмотки ротора возникает ток I_{2s} , который в соответствии с законом Ома для данной цепи можно найти, исходя из выражения

$$I_{2s} = E_{2s}/Z_{2s} = E_{2s}/\sqrt{R_2^2 + X_{2s}^2},$$

где Z_{2s} — полное сопротивление фазы ротора; R_2 — ак-

тивное сопротивление фазы ротора (для двигателей нормального исполнения можно считать постоянным и независимым от частоты тока ротора); X_{2s} — индуктивное сопротивление фазы ротора при данных скольжениях ротора и частотах тока ротора.

С учетом того, что $E_{2s} = sE_2$ и $X_{2s} = 2\pi f_{2s}L_2 = sX_2$, получаем выражение для ротора в другом виде:

$$I_{2s} = sE_2 / \sqrt{(R_2/s)^2 + X_2^2} = I_2.$$

Из формулы видно, что ток ротора вращающегося двигателя можно определить через ЭДС неподвижного ротора. Сопротивление X_2 , входящее в выражение для тока ротора, соответствует частоте f_1 и является постоянным, а активное сопротивление электрической цепи ротора при этом зависит от скольжения и находят его как отношение $R_2/s = R_2 + R_2[(1-s)/s]$.

С учетом этого и выражения для тока ротора схема замещения вращающегося ротора асинхронного электродвигателя может быть приведена к схеме замещения неподвижного ротора, представленной на рис. 13.5.

При построении схемы замещения асинхронного электродвигателя, параметры схемы замещения ротора, подобно тому как это было сделано для вторичной обмотки трансформатора, приводят к числу витков и ЭДС обмотки статора электродвигателя. В результате полная схема замещения асинхронного электродвигателя имеет вид, показанный на рис. 13.6.

Представление о распределении потока энергии, потребляемой асинхронным электродвигателем из сети, дает

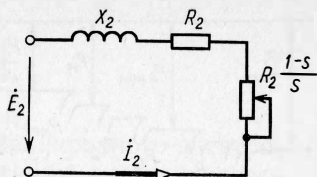


Рис. 13.5

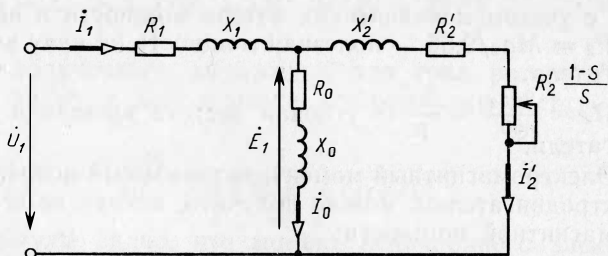


Рис. 13.6

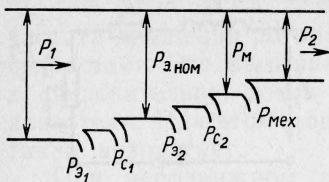


Рис. 13.7

энергетическая диаграмма рис. 13.7, на которой дана полная структура потерь мощности, возникающих при работе в асинхронном электродвигателе:

$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1$ — активная мощность, подводимая к электродвигателю из сети;

$P_{\Sigma 1} = m_1 I_1^2 R_1$ — электрические потери мощности в активном сопротивлении обмотки (потери в меди) статора; где m_1 — число фаз обмотки статора; I_1 — ток фазы статора;

$P_{\Sigma 1} = P_{\Sigma 1} = P_{\Gamma} + P_{\text{в}}$ — потери мощности в магнитопроводе статора, равные сумме потерь мощностей на гистерезис и вихревые токи (потери в стали статора);

$P_{\Sigma 2} = \Omega_1 M = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2$ — электромагнитная мощность, передаваемая ротору вращающимся магнитным полем, здесь m_2 — число фаз обмотки ротора; E_2 — ЭДС неподвижного ротора; I_2 — фазный ток ротора; ψ_2 — угол между током и ЭДС ротора; $\Omega_1 = 2\pi n_1 / 60 = \omega_1 / p$ — угловая частота вращения магнитного поля статора;

$P_{\Sigma 2} = P_{\Sigma 2}$ — потери мощности в магнитопроводе ротора, равные сумме потерь мощностей на гистерезис и вихревые токи в роторе;

$P_{\Sigma 2} = m_2 I_2^2 R_2$ — электрические потери мощности в обмотках (потери в меди) ротора, где I_2 — фазный ток ротора;

$P_{\text{мех}}$ — механические потери мощности в двигателе (потери мощности, возникаемые от трения в подшипниках и трения ротора о воздух);

$P_{\text{м}} = \Omega_2 M$ — мощность, развиваемая электродвигателем с учетом механических потерь мощности в нем;

$P_2 = M n_2 / 9,55$ — полезная мощность на валу электродвигателя.

$\Omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60} = \frac{\omega_2}{p}$ — угловая частота вращения ротора двигателя.

Электромагнитный момент, развиваемый асинхронным электродвигателем, можно получить, исходя из его электромагнитной мощности:

$$P_{\Sigma 2} = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = 4,44 k_2 m_2 f_1 \omega_2 \Phi_m I_2 \cos \psi_2 = \frac{\omega_1}{p} M,$$

откуда электромагнитный момент

$$M = c\Phi_m I_2 \cos\psi_2,$$

где постоянная $c = 4,44k_2 m_2 p f_1 \omega_2 / \omega_1$.

Из формулы видно, что момент асинхронного электродвигателя пропорционален произведению вращающегося магнитного потока на ток ротора и косинус угла сдвига по фазе между током ротора и его ЭДС.

Вращающий момент асинхронного двигателя можно определить и исходя из электрических потерь мощности в обмотках ротора. При этом находят сумму электрических потерь мощности в обмотках трех фаз:

$$P_{s2} = m_2 I_2^2 R_2 = P_{эм} - P_{мех} = M \frac{\omega_1 s}{p},$$

откуда

$$M = \frac{p m_2 I_2^2 R_2}{\omega_1 s} = \frac{p m_1 (I_2')^2 R_2'}{\omega_1 s}.$$

Из полученного выражения следует, что электромагнитный момент асинхронного электродвигателя пропорционален электрическим потерям в обмотках ротора.

При скольжении ротора $s = 1$ пусковой момент асинхронного двигателя (при $n_2 = 0$)

$$M_{\text{пуск}} = \frac{p m_1 (I_2')^2 R_2'}{\omega_1}.$$

Приведенный ток ротора I_2' можно выразить через параметры схемы замещения асинхронного электродвигателя (см. рис. 13.6) с учетом того, что полное сопротивление намагничивающего контура намного больше полного сопротивления обмотки статора двигателя, т. е. $z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} \gg Z_1 = \sqrt{R_1^2 + X_1^2}$,

$$I_2' = U_1 / \left[\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2'}{s} \right)^2 + (X_1 + X_2')^2} \right].$$

С учетом полученного выражения для тока ротора I_2' получаем формулу для момента асинхронного электродвигателя:

$$M = \frac{m_1 p R_2'}{\omega_1 s} \frac{U_1^2}{(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2}.$$

Из формулы видно, что момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату подводимого напряжения и зависит от скольжения ротора. Причем

имеется такое скольжение ротора, при котором электродвигатель развивает наибольший (критический) момент M_k . Максимальное (критическое) скольжение s_k ротора, соответствующее критическому моменту асинхронного электродвигателя, можно найти, взяв производную момента по скольжению (пренебрегая активным сопротивлением обмотки статора R_1 вследствие его относительной малости) и приравняв ее нулю. При этом $s_k = R'_2 / (X_1 + X'_2)$.

Подставив скольжение ротора s_k в формулу для момента (с учетом того, что $R_1 = 0$), получаем выражение для критического момента асинхронного электродвигателя:

$$M_k = \frac{m_1 p U_2}{2 \omega_1 (X_1 + X'_2)}.$$

В результате совместного решения приведенных уравнений получаем выражение для момента асинхронного электродвигателя, записанное через критические момент и скольжение ротора:

$$M = 2M_k / \left(\frac{s}{s_k} + \frac{s_k}{s} \right).$$

Зависимость момента асинхронного двигателя от скольжения ротора $M(s)$, построенная согласно полученному уравнению, имеет вид, представленный на рис. 13.8. Эта зависимость фактически является механической характеристикой асинхронного электродвигателя (рис. 13.9), так как частота вращения ротора связана с его скольжением выражением $n_2 = n_1(1 - s)$.

Анализ показывает, что в интервале скольжений от $s = 0$ до $s = s_k$ механическая характеристика будет устойчивой, так как $dM/ds > 0$, т. е. при возрастании момента нагрузки на валу происходит возрастание мо-

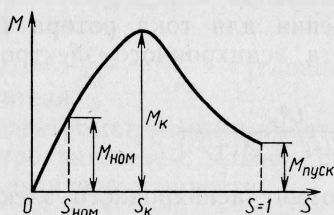


Рис. 13.8

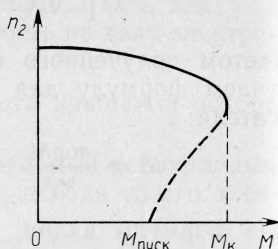


Рис. 13.9

мента, развиваемого электродвигателем. В то же время в интервале скольжений от $s = s_k$ до $s = 1$ механическая характеристика асинхронного двигателя оказывается неустойчивой, так как $dM/ds < 0$.

Так как между скольжением ротора и частотой вращения асинхронного электродвигателя существует прямая взаимосвязь, то, записав скольжение через частоту вращения ротора, представляем зависимость частоты вращения асинхронного двигателя от момента в виде кривой $n_2(M)$, также называемой механической характеристикой асинхронного двигателя (рис. 13.9).

Зависимости момента M , потребляемой мощности P_1 , коэффициента мощности $\cos \varphi$, КПД η , скольжения ротора s и тока статора I_1 , потребляемого двигателем из сети, от полезной мощности, т. е. мощности на валу двигателя P_2 (рис. 13.10), являются рабочими характеристиками асинхронного электродвигателя.

При этом зависимость $M(P_2)$ определяется формулой $M = 9,55 P_2 / n_2$, из которой следует, что эта зависимость представляет собой несколько искривленную прямую, проходящую через начало координат, так как с изменением нагрузки на валу частота вращения ротора двигателя несколько уменьшается.

Характер зависимости $\cos \varphi(P_2)$, т. е. зависимости коэффициента мощности асинхронного двигателя от мощности на валу, определяется выражением $\cos \varphi = P_2 / \sqrt{3} U_1 I_1$.

Значение коэффициента мощности для нормальных асинхронных двигателей средней мощности при номинальной нагрузке составляет 0,83—0,89. С уменьшением нагрузки на валу двигателя коэффициент мощности снижается и доходит до значений 0,2—0,3 при холостом

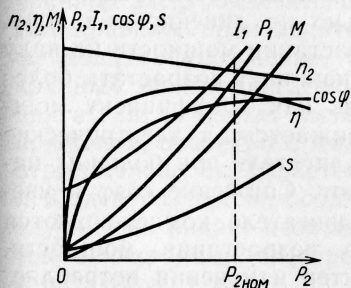


Рис. 13.10

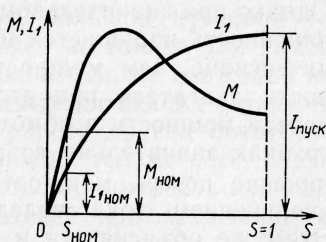


Рис. 13.11

ходе. В этом режиме полезная мощность на валу равна нулю, однако при этом двигатель потребляет мощность из сети, поэтому коэффициент мощности здесь не равен нулю. С увеличением нагрузки сверх номинальной наблюдается некоторое снижение значения коэффициента мощности за счет увеличения падения напряжения на индуктивной составляющей сопротивления обмотки статора асинхронного двигателя. Характер изменения коэффициента мощности от нагрузки асинхронного двигателя имеет примерно такой же вид и изменяется по тем же причинам, что и у трансформатора.

Зависимость КПД асинхронного двигателя от нагрузки $\eta(P_2)$ определяется формулой

$$\eta = P_2/P_1 = P_2/(P_2 + P_{\Sigma}),$$

где P_1 — активная мощность, потребляемая двигателем из питающей сети; $P_{\Sigma} = P_m + P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$ — суммарные потери мощности в двигателе, равные сумме потерь мощности в магнитопроводе, электрических потерь мощности в обмотках статора, электрических потерь мощности в обмотке ротора, механических потерь и добавочных потерь мощности. При отсутствии нагрузки $P_2 = 0$, поэтому КПД электродвигателя при этом также равен нулю.

С увеличением нагрузки КПД двигателя растет и принимает наибольшее значение при условии, что постоянные потери мощности в электродвигателе ($P_m + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$) оказываются равными переменным потерям мощности ($P_{\Sigma 1} + P_{\Sigma 2}$) в нем. При дальнейшем росте нагрузки КПД электродвигателя, так же как и у трансформатора, снижается. Ток статора при отсутствии нагрузки равен току холостого хода ($I_1 = I_0$). При увеличении мощности на валу электродвигателя возрастает и ток I_1 , потребляемый двигателем из питающей сети. Увеличение тока происходит приблизительно по линейному закону. Однако при значительном возрастании мощности на валу линейность нарушается и ток начинает возрастать более интенсивно, чем мощность, так как коэффициент мощности двигателя при этом снижается, а электрические потери мощности в обмотках двигателя при больших нагрузках значительно возрастают. Снижение $\cos \varphi$ и увеличение потерь мощности в двигателе компенсируются увеличением тока вследствие возрастания мощности. Этим же объясняется и характер изменения потребляемой из сети мощности $P_1(P_2)$.

С увеличением мощности на валу, т. е. с увеличением нагрузки двигателя, вызываемой возрастанием момента сопротивления исполнительного механизма, частота вращения (число оборотов) ротора уменьшается, а его скольжение при этом возрастает, вызывая увеличение ЭДС E_2 в обмотках ротора, а следовательно, возрастание токов ротора и статора. При неизменном магнитном потоке двигателя это приводит к увеличению момента, развиваемого двигателем. Таким образом, с увеличением нагрузки на валу равновесие между моментом, развиваемым двигателем, и моментом сопротивления наступает при снижении частоты вращения. При возрастании мощности на валу электродвигателя происходит снижение частоты вращения ротора.

При включении асинхронного электродвигателя в питающую сеть обмотка его статора, обтекаемая переменным током, создает вращающееся магнитное поле. В момент пуска частота вращения ротора электродвигателя равна нулю, в то время как вращающееся поле вследствие того, что оно безынерционно, мгновенно приобретает синхронную частоту вращения по отношению к ротору, в результате в обмотке ротора наводится большая ЭДС. При этом токи ротора и статора в несколько раз превосходят номинальные их значения, так как они увеличиваются с увеличением скольжения ротора, т. е. с уменьшением его частоты вращения (рис. 13.11).

Пусковой ток асинхронных двигателей с короткозамкнутым ротором в 5—10 раз превышает номинальный (пусковой момент составляет 1,1—1,8 от номинального значения момента). Так как этот ток протекает по обмоткам электродвигателя кратковременно, только в процессе пуска, он не опасен для двигателя в тепловом отношении, если пуски двигателя не очень часты. Поэтому пуск асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором, как правило, производится прямым включением в сеть, на полное напряжение. Однако большой пусковой ток крупных электродвигателей опасен не только для самого двигателя, он может вызвать значительное снижение напряжения, особенно в маломощных питающих сетях, что отрицательно сказывается на работе других потребителей электроэнергии, подключенных к той же сети. В этих случаях возникает необходимость ограничивать пусковой ток асинхронных электродвигателей при включении их в питающую сеть.

Снижение напряжения на обмотках асинхронного

электродвигателя при пуске может быть достигнуто различными способами: а) пуском с использованием автотрансформатора или индукционного регулятора; б) пуском с переключением обмотки статора со звезды на треугольник; в) пуском с включением дополнительного сопротивления в обмотку статора двигателя. Однако при снижении напряжения при пуске пусковой момент асинхронного двигателя резко снижается, так как он пропорционален квадрату значения питающего напряжения. Поэтому указанные способы пуска, как правило, применяются для приводных двигателей тех механизмов, для пуска которых не требуется большой пусковой момент (при пуске двигателя вхолостую или двигателя вентилятора и других механизмов).

Асинхронный электродвигатель с фазным ротором пускают в ход с помощью пускового реостата, включенного последовательно с обмоткой ротора (см. рис. 13.4). В начальный момент пусковое активное сопротивление реостата вводится в цепь двигателя полностью. С увеличением оборотов частота вращения вращающегося магнитного поля по отношению к ротору уменьшается. Соответственно уменьшаются ЭДС и ток ротора. Поэтому с увеличением частоты вращения двигателя можно постепенно уменьшать значение пускового сопротивления в цепи обмотки ротора, не опасаясь того, что ток двигателя возрастет до значений, опасных для него. При полностью выведенном сопротивлении пускового реостата пуск двигателя заканчивается.

Такой способ позволяет обеспечить необходимый для пуска пусковой момент двигателя. Значение пускового момента зависит от значения активного сопротивления в цепи ротора и может быть доведено до критического момента M_k двигателя.

Существенный недостаток асинхронных электродвигателей — относительно сложное регулирование частоты их вращения.

Возможные способы регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей можно установить в результате анализа выражения, записанного относительно частоты вращения ротора двигателя: $n_2 = 60f_1(1 - s)/p$. Анализ этой формулы показывает, что частоту вращения асинхронного двигателя можно изменить, меняя скольжение ротора s , число пар полюсов p двигателя или частоту f_1 питающего напряжения.

Регулирование частоты вращения изменением сколь-

жения производят изменением активного сопротивления в цепи ротора (для асинхронных двигателей с фазным ротором), в обмотку которого (с помощью контактных колец) включают добавочное сопротивление.

При увеличении активного сопротивления цепи ротора значение критического скольжения ротора двигателя s_k в соответствии с приведенной ранее формулой увеличивается.

При этом можно получить семейство механических характеристик электродвигателя при разных добавочных сопротивлениях (рис. 13.12), из которых видно, что при постоянном моменте нагрузки на валу электродвигателя с увеличением активного сопротивления в цепи ротора рабочая точка смещается с одной механической характеристики на другую, соответствующую новому, возросшему сопротивлению цепи ротора. Происходит увеличение скольжения ротора, а следовательно, уменьшение частоты вращения ротора асинхронного двигателя.

При рассматриваемом способе возможно регулирование частоты вращения двигателя в пределах от номинального значения $n_{ном}$ до его значения, равного нулю. Однако при этом возникают значительные потери мощности в дополнительном активном сопротивлении цепи ротора, пропорциональные квадрату тока ротора, что делает этот способ неэкономичным.

Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамкнутых электродвигателей изменением скольжения может быть достигнуто за счет уменьшения напряжения на зажимах двигателя. При этом критический момент асинхронного двигателя уменьшается, жесткость механической характеристики также уменьшается, а скольжение ротора двигателя при том же моменте нагрузки возрастает. Происходит уменьшение частоты вращения электродвигателя. Регулирование асинхронного двигателя при этом способе возможно только в незначительном диапазоне скольжений, который ограничивается критическим моментом и скольжением ротора.

Следует отметить, что при уменьшении напряжения происходит резкое снижение критического момента дви-

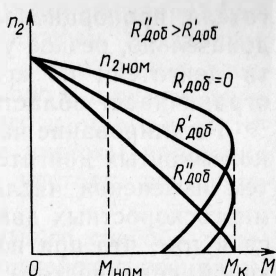


Рис. 13.12

гателя, пропорционального квадрату напряжения, а следовательно, резкое уменьшение перегрузочной способности двигателя по кратности критического момента, что ограничивает область применения этого способа.

Регулирование частоты вращения асинхронных короткозамкнутых двигателей, как указывалось, возможно путем изменения числа пар полюсов, что применимо для многоскоростных двигателей. Сущность этого заключается в том, что при постоянной частоте напряжения питающей сети частота вращения асинхронного двигателя зависит от числа пар полюсов обмотки статора. Таким образом, если на статоре асинхронного двигателя разместить две или несколько отдельных обмоток с разными числами пар полюсов, то при включении в сеть каждой из обмоток в отдельности можно получить различные частоты вращения вращающегося магнитного поля и вращения ротора.

Для увеличения диапазона регулирования частоты вращения поля статор асинхронного двигателя снабжается двумя независимыми обмотками, каждая из которых может переключаться на число пар полюсов в отношении 1:2. В этом случае асинхронный двигатель будет иметь четыре ступени скорости (рис. 13.13). Кроме электродвигателей, рассчитанных на одну частоту вращения, отечественная промышленность выпускает двух-, трех- и четырехскоростные асинхронные короткозамкнутые электродвигатели с соответствующим числом пар полюсов.

Регулирование частоты вращения асинхронных двигателей путем переключения числа пар полюсов производится без потерь мощности. Однако многоскоростные электродвигатели гораздо сложнее по конструкции и до-

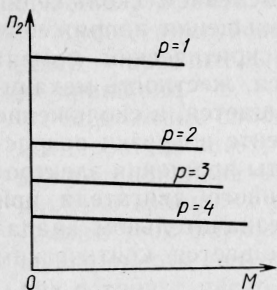


Рис. 13.13

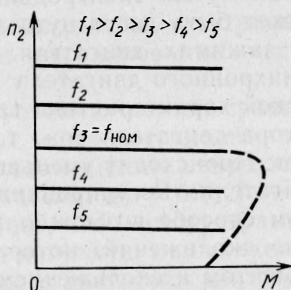


Рис. 13.14

роже обычных односкоростных. При этом регулирование частоты вращения оказывается ступенчатым, неплавным.

Регулирование частоты вращения асинхронных электродвигателей может быть осуществлено и путем изменения частоты напряжения, подводимого к обмотке статора. При этом происходит изменение частоты вращения вращающегося магнитного поля и частоты вращения ротора электродвигателя (рис. 13.14).

Существенным недостатком частотного способа регулирования является необходимость применения специального оборудования, в частности преобразователей частоты, что значительно усложняет систему электропривода и увеличивает массу, габариты и стоимость установки. Однако с развитием полупроводниковой техники, появления тиристоров и других полупроводниковых приборов этот способ нашел широкое применение.

Задание по работе

1. Ознакомиться с устройством и конструкцией исследуемого трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.
2. Снять и построить рабочие и механическую характеристики исследуемого асинхронного электродвигателя.
3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с устройством трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором на демонстрационном стенде лаборатории и отметить особенность его конструкции. Записать тип и номинальные данные исследуемого электродвигателя:

Тип электродвигателя	4АМА71АЧУЗ
Номинальное напряжение, В	3×220/380
Номинальная мощность, кВт	0,55
Номинальный ток, А	2,9/1,7
Номинальная частота напряжения питания, Гц	50
Номинальная частота вращения ротора, об/мин	1370
Номинальный КПД, %	70,5
Номинальный коэффициент мощности ($\cos\varphi_{\text{ном}}$)	0,70

2. На рабочей панели «Асинхронный электродвигатель» стенда (секция 2) собрать электрическую цепь

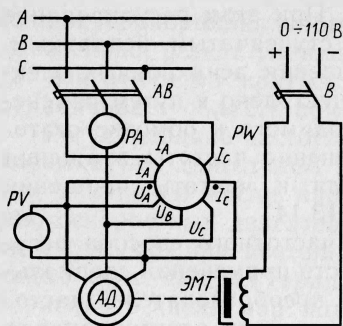


Рис. 13.15

(рис. 13.15) для снятия рабочих и механической характеристик исследуемого электродвигателя.

Сборку этой цепи производят соединителями в соответствии с монтажной схемой рис. 13.16. Измерение линейного напряжения питания, линейного тока (I_1 , I_1) и потребляемой активной мощности (P_1) электродвигателя производить измеритель-

ными приборами: вольтметром с пределом измерения 250 В, амперметром с пределом измерения 7,5 А и трехфазным ваттметром.

3. Произвести проверку электрического нуля прибора «Момент агрегата № 1». Для этого ручку регулятора «Момент нагрузки» на панели «Нагрузочные устройства» стенда установить в крайнее левое положение, нажать кнопки «Сеть» и «Агрегат № 1», тем самым включив цепи измерения момента и частоты вращения агрегата № 1. Балансировка прибора производится соответствующими переменными резисторами.

4. Произвести пуск асинхронного электродвигателя нажатием кнопки «Включение асинхронной и синхронной машины», расположенной на панели «Машины переменного тока».

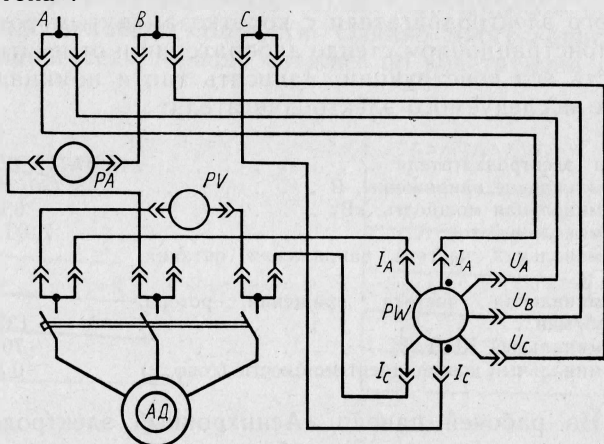


Рис. 13.16

Таблица 13.1

Номера измерений	Измерения					Вычисления			
	U_1 , В	I_1 , А	P_1 , кВт	M , Н·м	n_2 , об/мин	P_2 , кВт	s	$\cos\varphi_1$	η
1									
2									
...									

5. Снять рабочие и механическую характеристики электродвигателя, т.е. $I_1(P_2)$, $P_1(P_2)$, $M(P_2)$, $\cos\varphi(P_2)$, $\eta(P_2)$, $s(P_2)$, $n_2(M)$ при $U_1 = \text{const}$:

а) изменять нагрузку на валу асинхронного электродвигателя от режима холостого хода до режима, при котором мощность на валу $P_2 = (1,2 \div 1,5)P_{2\text{ном}}$. Изменение нагрузки на валу исследуемого электродвигателя производится изменением тока в цепи обмотки электромагнитного тормоза, соединенного с валом асинхронного электродвигателя, ручкой регулятора «Момент нагрузки» на панели «Нагрузочные устройства» стенда;

б) в указанном диапазоне изменения нагрузки произвести 6—7 измерений, записать показания измерительных приборов в табл. 13.1. Одно из измерений должно соответствовать номинальному режиму работы двигателя;

в) после окончания опыта нагрузки отключить электродвигатель от сети, нажав кнопку «Откл.» на нагрузочной панели стенда.

6. Обработка результатов измерений:

По измеренным значениям п. 5 вычислить:

а) мощность на валу асинхронного электродвигателя, кВт (см. табл. 13.1)

$$P_2 = Mn_2/9550;$$

б) скольжение ротора асинхронного электродвигателя

$$s = (n_1 - n_2)/n_1,$$

где n_1 — частота вращения магнитного поля статора, об/мин;

в) коэффициент мощности электродвигателя

$$\cos\varphi_1 = P_1/\sqrt{3} U_1 I_1,$$

где P_1 — активная мощность, потребляемая электродвигателем, Вт;

г) КПД электродвигателя

$$\eta = P_2/P_1.$$

7. По измеренным и вычисленным значениям в единой системе координат построить рабочие характеристики, а в другой координатной системе — механическую характеристику асинхронного электродвигателя.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.

2. Как изменить направление вращения трехфазного асинхронного электродвигателя?

3. Как изменяется значение тока холостого хода асинхронного электродвигателя с изменением величины воздушного зазора?

4. Почему с возрастанием нагрузки на валу асинхронного электродвигателя энергетические показатели его вначале возрастают, а затем снижаются?

5. Как изменяется максимальный (критический) момент асинхронного электродвигателя с изменением питающего напряжения?

6. Как изменяется частота тока ротора асинхронного электродвигателя с изменением нагрузки на валу?

7. Перечислите способы пуска асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

8. Перечислите все виды потерь мощности в асинхронных электродвигателях.

9. Назовите способы регулирования частоты вращения асинхронных электродвигателей с короткозамкнутым ротором.

10. Как влияет на пусковой момент активное сопротивление пускового реостата асинхронного электродвигателя с фазным ротором?

Лабораторная работа 14

Электродвигатель постоянного тока

Цель работы. Ознакомиться с устройством, принципом действия, основными характеристиками и методами испытаний электродвигателей постоянного тока.

Основные теоретические положения

Электродвигатель постоянного тока — электрическая машина, предназначенная для преобразования электрической энергии постоянного тока в механическую.

Электродвигатели постоянного тока в конструктивном отношении не отличаются от генераторов постоянного тока, так как электрические машины постоянного тока обратимы и могут работать как в генераторном, так и в

двигательном режиме. На неподвижной части электродвигателя постоянного тока — статоре (станине 1) расположены главные 2 и дополнительные 3 полюса с обмотками возбуждения 4 и 5. Подвижной частью электродвигателя является якорь 6, набранный из тонких изолированных друг от друга листов электротехнической стали для уменьшения потерь мощности в магнитопроводе якоря. В пазах якоря размещается обмотка якоря 7, выводы которой соединяются с пластинами коллектора 8, монтируемого на валу электродвигателя (рис. 14.1).

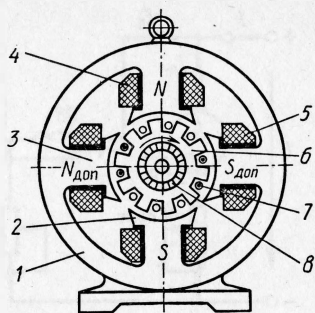


Рис. 14.1

При подаче постоянного напряжения к зажимам электрической машины постоянного тока в обмотках возбуждения и якоря возникает ток. В результате взаимодействия тока якоря с магнитным потоком, создаваемым обмоткой возбуждения в магнитопроводе статора, возникает электромагнитный момент электродвигателя, под действием которого якорь приходит во вращение. При этом электромагнитный момент, развиваемый двигателем,

$$M = c_m \Phi I_{\text{я}},$$

где c_m — коэффициент, зависящий от конструкции обмотки якоря и числа полюсов электродвигателя; Φ — магнитный поток одной пары главных полюсов электродвигателя; $I_{\text{я}}$ — ток якоря двигателя.

При вращении якоря в его обмотке в результате пересечения магнитных силовых линий наводится ЭДС, которая при работе машины в режиме двигателя направлена против тока якоря и, так же как и при работе машины в режиме генератора, равна

$$E = c_e \Phi n,$$

где n — частота вращения якоря электродвигателя, c_e — коэффициент, зависящий от конструктивных элементов машины.

Для изменения направления вращения электродвигателя постоянного тока необходимо изменить полярность напряжения, подводимого к якорю или обмотке возбуждения. В зависимости от способа включения обмотки возбуждения различают электродвигатели постоянного тока

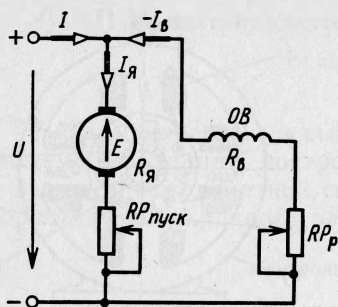


Рис. 14.2

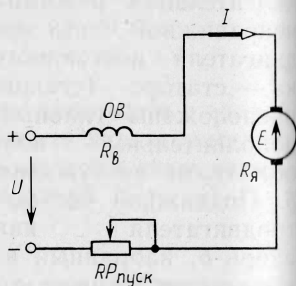


Рис. 14.3

с параллельным, последовательным и смешанным возбуждением.

У двигателей с *параллельным* возбуждением обмотка рассчитана на полное напряжение питающей сети и включается параллельно цепи якоря (рис. 14.2).

Двигатель с *последовательным* возбуждением имеет обмотку возбуждения, которая включается последовательно с якорем, поэтому эта обмотка рассчитана на полный ток якоря (рис. 14.3).

Двигатели со *смешанным* возбуждением имеют две обмотки, одна включается параллельно, другая — последовательно с якорем (рис. 14.4).

При пуске электродвигателей постоянного тока (независимо от способа возбуждения) путем прямого включения в питающую сеть возникают значительные пусковые токи, которые могут привести к выходу их из строя. Это происходит в результате выделения значительного количества теплоты в обмотке якоря и последующего нарушения ее изоляции. Поэтому пуск двигателей постоянного тока производится специальными пусковыми приспособлениями. В большинстве случаев для этих целей применяется простейшее пусковое приспособление — пусковой реостат. Процесс пуска электродвигателя постоянного тока с пусковым реостатом показан на примере двигателя постоянного тока с параллельным возбуждением (см. рис. 14.2).

Исходя из уравнения, составленного в соответствии со вторым законом Кирхгофа для правой части электрической цепи (см. рис. 14.2), ток якоря

$$I_{\text{я}} = \frac{U - E}{R_{\text{я}}} = \frac{U - c_e n \Phi}{R_{\text{я}}},$$

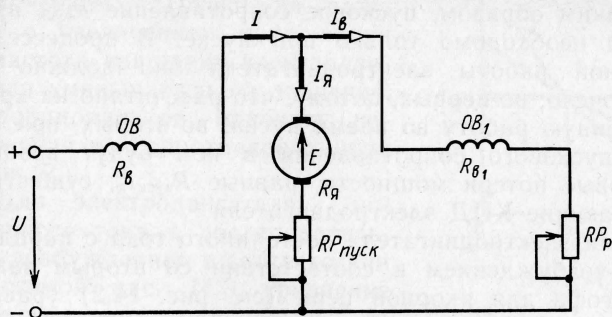


Рис. 14.4

где U — напряжение, подводимое к электродвигателю; $R_{\text{я}}$ — сопротивление обмотки якоря.

В начальный момент пуска электродвигателя частота вращения якоря $n = 0$, поэтому противоэлектродвижущая сила, наводимая в обмотке якоря, в соответствии с полученным ранее выражением также будет равной нулю ($E = 0$).

Сопротивление обмотки якоря $R_{\text{я}}$ — величина довольно малая. Для того чтобы ограничить возможный при этом недопустимо большой ток в цепи якоря при пуске, последовательно с якорем независимо от способа возбуждения двигателя включается пусковой реостат (пусковое сопротивление $R_{\text{пуск}}$). В этом случае пусковой ток якоря

$$I_{\text{я пуск}} = \frac{U - 0}{R_{\text{я}} + R_{\text{пуск}}}.$$

Сопротивление пускового реостата $R_{\text{пуск}}$ рассчитывают для работы только на время пуска и подбирают таким образом, чтобы пусковой ток якоря электродвигателя не превышал допустимого значения ($I_{\text{я пуск}} \leq 2I_{\text{я ном}}$). По мере разгона электродвигателя ЭДС, наводимая в обмотке якоря, вследствие возрастания частоты его вращения n возрастает ($E = c_e n \Phi$). В результате этого ток якоря при прочих равных условиях уменьшается. При этом сопротивление пускового реостата $R_{\text{пуск}}$ по мере разгона якоря электродвигателя необходимо постепенно уменьшать. После окончания разгона двигателя до номинального значения частоты вращения якоря ЭДС возрастает настолько, что пусковое сопротивление может быть сведено к нулю, без опасности значительного возрастания тока якоря.

Таким образом, пусковое сопротивление $R_{\text{пуск}}$ в цепи якоря необходимо только при пуске. В процессе нормальной работы электродвигателя оно должно быть отключено, во-первых, потому, что рассчитано на кратковременную работу во время пуска, во-вторых, при наличии пускового сопротивления в нем будут возникать тепловые потери мощности, равные $R_{\text{пуск}} I_{\text{я}}^2$, существенно снижающие КПД электродвигателя.

Для электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением в соответствии со вторым законом Кирхгофа для якорной цепи (см. рис. 14.2) уравнение электрического равновесия имеет вид $E = U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}$.

С учетом выражения для ЭДС ($E = c_e n \Phi$), записав полученную формулу относительно частоты вращения, получаем уравнение частотной (скоростной) характеристики электродвигателя $n(I_{\text{я}})$:

$$n = \frac{U - R_{\text{я}} I_{\text{я}}}{c_e \Phi} = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}}}{c_e \Phi} I_{\text{я}}.$$

Из него следует, что при отсутствии нагрузки на валу и токе якоря $I_{\text{я}} = 0$ частота вращения электродвигателя при данном значении питающего напряжения

$$n = U / c_e \Phi = n_0.$$

Частота вращения электродвигателя n_0 является частотой вращения идеального холостого хода. Кроме параметров электродвигателя она зависит также от значения подводимого напряжения и магнитного потока. С уменьшением магнитного потока при прочих равных условиях частота вращения идеального холостого хода возрастает. Поэтому в случае обрыва цепи обмотки возбуждения, когда ток возбуждения становится равным нулю ($I_{\text{в}} = 0$), магнитный поток двигателя снижается до значения, равного значению остаточного магнитного потока $\Phi_{\text{ост}}$. При этом двигатель «идет в разнос», развивая частоту вращения, на много большую номинальной, что представляет определенную опасность как для двигателя, так и для обслуживающего персонала.

Частотная (скоростная) характеристика электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением $n(I_{\text{я}})$ при постоянном значении магнитного потока $\Phi = \text{const}$ и постоянном значении подводимого напряжения $U = \text{const}$ имеет вид прямой 1 (рис. 14.5).

Из рассмотрения этой характеристики видно, что с

увеличением нагрузки на валу, т. е. с увеличением тока якоря $I_{\text{я}}$, частота вращения электродвигателя уменьшается на значение, пропорциональное падению напряжения на сопротивлении цепи якоря $R_{\text{я}}$.

Для электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением в соответствии со схемой рис. 14.3 уравнение электрического равновесия по второму закону Кирхгофа имеет вид

$$U = E + (R_{\text{я}} + R_{\text{в}})I_{\text{я}},$$

где $R_{\text{в}}$ — сопротивление последовательной обмотки возбуждения двигателя.

С учетом того, что $E = c_e n \Phi$, уравнение частотной характеристики электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением приводится к следующему виду:

$$n = \frac{U - (R_{\text{я}} + R_{\text{в}})I_{\text{я}}}{c_e \Phi}.$$

Как видно из этого уравнения, частота вращения этого двигателя зависит также и от сопротивления обмотки возбуждения $R_{\text{в}}$.

Примем во внимание то, что у двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением (см. рис. 14.3) с изменением тока якоря вследствие изменения магнитного потока (в результате изменения тока якоря, от которого он зависит) частотная характеристика будет иметь вид, представленный на рис. 14.5 (зависимость 2).

Из этого уравнения также видно, что с уменьшением нагрузки, т. е. с уменьшением тока якоря и, как следствие этого, с уменьшением магнитного потока частота вращения двигателя постоянного тока с последовательным возбуждением резко возрастает, достигая большого значения при отсутствии нагрузки. Поэтому двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением «идут в разнос» в режиме холостого хода.

Двигатель постоянного тока со смешанным возбуждением, кроме обмотки параллельного возбуждения, магнитный поток которой $\Phi_1 = \text{const}$ при постоянном значении напряжения $U = \text{const}$, имеет последовательную

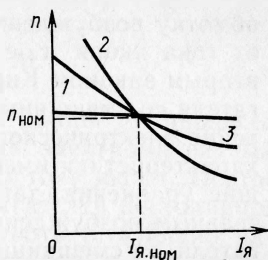


Рис. 14.5

обмотку возбуждения, магнитный поток которой зависит от тока якоря, т. е. от его нагрузки. В соответствии со вторым законом Кирхгофа для якорной цепи электродвигателя со смешанным возбуждением (см. рис. 14.4) уравнение электрического равновесия и уравнение частотной характеристики имеют такой же вид, как и соответствующие уравнения, записанные для двигателя с последовательным возбуждением. Вследствие того что электродвигатели со смешанным возбуждением имеют две обмотки возбуждения, результирующий магнитный поток оказывается равным сумме магнитных потоков, создаваемых последовательной и параллельной обмотками возбуждения:

$$\Phi = \Phi_1 + \Phi_2,$$

где Φ_1 , Φ_2 — магнитные потоки, создаваемые последовательной и параллельной обмотками возбуждения.

Благодаря наличию двух обмоток возбуждения (последовательной и параллельной) свойства электродвигателей постоянного тока со смешанным возбуждением представляют собой нечто среднее между свойствами двигателей постоянного тока с параллельным и последовательным возбуждением. Поэтому частотная характеристика электродвигателя со смешанным возбуждением имеет вид, представленный на рис. 14.5 (зависимость β), из которого видно, что эта характеристика располагается между частотными характеристиками двигателей постоянного тока с параллельным и последовательным возбуждением. Электродвигатели со смешанным возбуждением обладают улучшенными характеристиками по сравнению с двигателями с последовательным возбуждением и при отсутствии нагрузки на валу не «идут в разнос», так как частота вращения ограничивается при этом частотой вращения идеального холостого хода: $n_0 = U/c_e \Phi_2$.

Выражая в уравнениях частотных характеристик ток якоря через электромагнитный момент двигателя $M = c_m \Phi I_a$, получим уравнение механической характеристики, т. е. зависимости $n(M)$ при $U = \text{const}$ для двигателей с параллельным возбуждением

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_a}{c_e c_m \Phi^2} M$$

и для двигателей с последовательным и смешанным возбуждением

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{R_{\text{я}} + R_{\text{в}}}{c_e c_m \Phi^2} M.$$

Пренебрегая влиянием реакции якоря в процессе изменения нагрузки, можно принять электромагнитный момент двигателя пропорциональным току якоря. Поэтому механические характеристики двигателей постоянного тока имеют такой же вид, как и соответствующие частотные характеристики. Электродвигатель с параллельным возбуждением имеет жесткую механическую характеристику (кривая 1, рис. 14.6). Из этой характеристики видно, что его частота вращения с ростом момента нагрузки снижается незначительно, так как ток возбуждения при параллельном включении обмотки возбуждения и соответственно магнитный поток двигателя остаются практически неизменными, а сопротивление цепи якоря относительно мало.

Двигатели постоянного тока с последовательным возбуждением имеют мягкую механическую характеристику (кривая 2, рис. 14.6), поскольку с изменением момента нагрузки на валу изменяется ток якоря, а следовательно, и магнитный поток двигателя.

Двигатели постоянного тока со смешанным возбуждением имеют более мягкую механическую характеристику (кривая 3, рис. 14.6), чем двигатели с параллельным возбуждением, и более жесткую, чем двигатели с последовательным возбуждением.

Одной из важных характеристик электродвигателей постоянного тока является моментная характеристика, т. е. зависимость электромагнитного момента от тока якоря двигателя $M(I_{\text{я}})$. Для двигателей с параллельным возбуждением зависимость между моментом и током якоря определяется выражением $M = c_m \Phi I_{\text{я}}$. Пренебре-

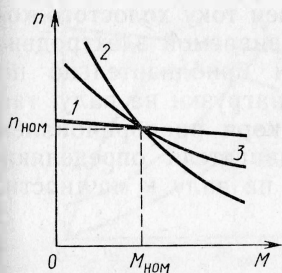


Рис. 14.6

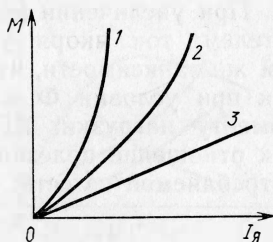


Рис. 14.7

гая влиянием реакции якоря для этих двигателей, можно принять $\Phi = \text{const}$, вследствие чего зависимость $M(I_{\text{я}})$ при $U = \text{const}$ представится в виде прямой, проходящей через начало координат (зависимость 3, рис. 14.7).

Для двигателей с последовательным возбуждением зависимость $M(I_{\text{я}})$ является более сложной, так как входящий в выражение $M = c_m \Phi I_{\text{я}}$ магнитный поток является функцией тока якоря. При некоторых допущениях для этих двигателей можно принять, что $M = k I_{\text{я}}^2$, где k — соответствующий коэффициент пропорциональности.

В результате моментная характеристика двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением представится в виде квадратичной зависимости, проходящей через начало координат (кривая 1, рис. 14.7).

Двигатели со смешанным возбуждением имеют моментную характеристику, занимающую среднее положение между зависимостями 1 и 3 (кривая 2, рис. 14.7).

Рабочие характеристики двигателей постоянного тока представляют собой зависимости частоты вращения n , момента M , тока якоря $I_{\text{я}}$ — и КПД (η) от полезной мощности на валу P_2 электродвигателя, т. е. $n(P_2)$, $M(P_2)$, $I_{\text{я}}(P_2)$, $\eta(P_2)$ при неизменном напряжении на его зажимах $U = \text{const}$.

Рабочие характеристики электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением представлены на рис. 14.8. Из этих характеристик видно, что частота вращения n электродвигателей с параллельным возбуждением с увеличением нагрузки несколько уменьшается. Зависимость полезного момента на валу двигателя от нагрузки P_2 представляет собой почти прямую линию, так как момент этого двигателя пропорционален нагрузке на валу: $M = 9,55 P_2 / n$. Искривление указанной зависимости объясняется некоторым снижением частоты вращения с увеличением нагрузки. При $P_2 = 0$ ток, потребляемый электродвигателем, равен току холостого хода. При увеличении мощности, развиваемой электродвигателем, ток якоря увеличивается приблизительно по той же зависимости, что и момент нагрузки на валу, так как при условии $\Phi = \text{const}$ ток якоря пропорционален моменту нагрузки. КПД электродвигателя определяют как отношение полезной мощности на валу к мощности, потребляемой из сети:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + P_{\text{я}} + P_{\text{эв}} + P_{\text{м}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}},$$

где P_2 — полезная мощность на валу; $P_1 = UI$ — мощность, потребляемая электродвигателем из питающей сети; $P_{\text{эя}} = I_{\text{я}}^2 R_{\text{я}}$ — электрические потери мощности в цепи якоря; $P_{\text{эв}} = UI_{\text{в}} = I_{\text{в}}^2 R_{\text{в}}$ — электрические потери мощности в цепи возбуждения; $P_{\text{мех}}$ — механические потери мощности; $P_{\text{доб}}$ — добавочные потери мощности; $P_{\text{м}}$ — потери мощности в магнитопроводе на гистерезис и вихревые токи.

КПД электродвигателя с увеличением мощности быстро нарастает и достигает максимального значения при условии, что переменные потери мощности в электродвигателе оказываются равными постоянным потерям мощности в нем, т. е. $P_{\text{м}} = P_{\text{эв}} + P_{\text{эя}} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доб}}$.

Рабочие характеристики электродвигателя постоянного тока с последовательным возбуждением представлены на рис. 14.9. Несколько другой вид рабочих характеристик этого электродвигателя по сравнению с двигателем с параллельным возбудителем объясняется тем, что с изменением нагрузки на валу (мощности P_2) происходит также изменение и магнитного потока.

Рабочие характеристики электродвигателей постоянного тока со смешанным возбуждением представляют собой зависимости, занимающие в прямоугольной системе координат некоторое среднее положение между рабочими характеристиками двигателей с параллельным и последовательным возбуждением.

Важным является также возможность регулирования частоты вращения электродвигателей постоянного тока. Анализ выражений для частотных характеристик показывает, что частоту вращения электродвигателей постоянного тока можно регулировать несколькими способами: включением добавочного сопротивления $R_{\text{доб}}$ в цепь яко-

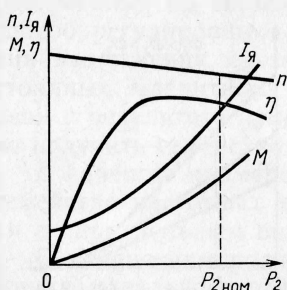


Рис. 14.8

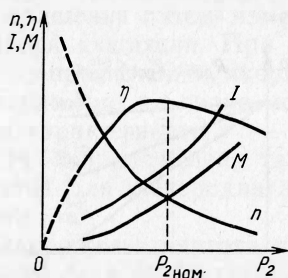


Рис. 14.9

ря, изменением магнитного потока Φ и изменением напряжения U , подводимого к двигателю.

Одним из наиболее распространенных является способ регулирования частоты вращения включением в цепь якоря электродвигателя добавочного сопротивления. С увеличением сопротивления в цепи якоря при прочих равных условиях происходит снижение частоты вращения. При этом чем больше сопротивление в цепи якоря, тем меньше частота вращения электродвигателя.

При неизменном напряжении питающей сети и неизменном магнитном потоке в процессе изменения значения сопротивления якорной цепи можно получить семейство частотных характеристик, например, для электродвигателя с параллельным возбуждением (рис. 14.10).

Преимущество рассмотренного способа регулирования заключается в его относительной простоте и возможности получить плавное изменение частоты вращения в широких пределах (от нуля до номинального значения частоты $n_{\text{ном}}$). К недостаткам этого способа следует отнести то, что имеют место значительные потери мощности в добавочном сопротивлении, увеличивающиеся с уменьшением частоты вращения, а также необходимость использования дополнительной регулирующей аппаратуры. Кроме того, этот способ не позволяет регулировать частоту вращения электродвигателя вверх от ее номинального значения.

Изменения частоты вращения электродвигателя постоянного тока можно достигнуть и в результате изменения значения магнитного потока возбуждения. При изменении магнитного потока в соответствии с уравнением частотной характеристики для двигателей постоянного тока с параллельным возбуждением при постоянном значении напряжения питающей сети и неизмен-

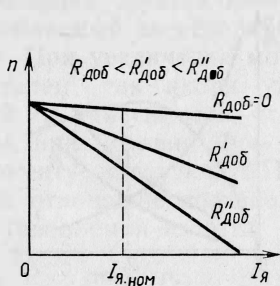


Рис. 14.10

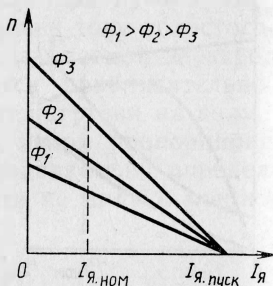


Рис. 14.11

ном значении сопротивления якорной цепи можно получить семейство частотных характеристик, представленных на рис. 14.11.

Как видно из этих характеристик, с уменьшением магнитного потока частота вращения идеального холостого хода электродвигателя n_0 возрастает. Так как при частоте вращения, равной нулю, ток якоря электродвигателя, т. е. пусковой ток, не зависит от магнитного потока, то частотные характеристики семейства не будут параллельными друг другу, причем жесткость характеристик уменьшается с уменьшением магнитного потока (увеличение магнитного потока двигателя обычно не производится, так как при этом ток обмотки возбуждения превышает допустимое, т. е. номинальное, его значение). Таким образом, изменение магнитного потока позволяет регулировать частоту вращения электродвигателя только вверх от номинального ее значения, что является недостатком данного способа регулирования. К недостаткам этого способа следует отнести также относительно небольшой диапазон регулирования вследствие наличия ограничений по механической прочности и коммутации электродвигателя.

Преимуществом данного способа регулирования является его простота. Для двигателей с параллельным возбуждением это достигается изменением сопротивления регулировочного реостата R_p в цепи возбуждения.

У двигателей постоянного тока с последовательным возбуждением изменение магнитного потока достигается шунтированием обмотки возбуждения сопротивлением, имеющим соответствующее значение, либо замыканием накоротко определенного количества витков обмотки возбуждения.

Широкое применение, особенно в электроприводах, построенных по системе генератор — двигатель, получил способ регулирования частоты вращения путем изменения напряжения на зажимах якоря двигателя. При постоянных магнитном потоке и сопротивлении якорной цепи в результате изменения напряжения на якоре можно получить семейство частотных характеристик.

В качестве примера на рис. 14.12 представлено такое семейство частотных характеристик для электродвигателя с параллельным возбуждением.

С изменением подводимого напряжения частота вращения идеального холостого хода n_0 в соответствии с приведенным ранее выражением изменяется пропорцио-

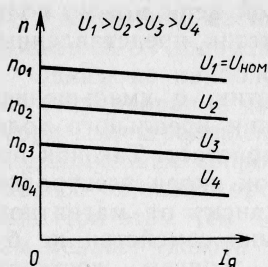


Рис. 14.12

нально напряжению. Так как сопротивление цепи якоря остается неизменным, то жесткость семейства механических характеристик, не отличается от жесткости естественной механической характеристики при $U = U_{ном}$.

Преимуществом рассмотренного способа регулирования является широкий диапазон изменения частоты вращения без увеличения потерь мощности. К недостаткам данного способа следует отнести то, что при этом необходим источник регулируемого питающего напряжения, а это приводит к увеличению массы, габаритов и стоимости установки.

Задание по работе

1. Ознакомиться с устройством и конструкцией исследуемого электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.
2. Снять и построить рабочие, механическую и частотную характеристики электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.
3. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться на демонстрационном стенде «Машины постоянного тока» с устройством электродвигателя постоянного тока, а на лабораторном стенде — с приборами, аппаратами и подлежащим испытанию электродвигателем. Записать в отчет по лабораторной работе технические паспортные данные двигателя:

Тип электродвигателя*	П-21
Номинальная мощность, кВт	1,5
Номинальное напряжение, В	220
Номинальная частота вращения, об/мин	3000
Номинальный ток, А	8,8
Номинальный КПД	0,77

* В качестве электродвигателя используется генератор постоянного тока типа П-21.

2. На рабочей панели стенда «Двигатель постоянного тока» в соответствии с принципиальной схемой рис. 14.13 собрать электрическую цепь для снятия характеристик электродвигателя постоянного тока параллельного возбуждения. Монтаж электрической цепи производить согласно монтажной схеме, указанной на рис. 14.14. В качестве нагрузки на валу испытуемого электродвигателя используется электромагнитный тормоз, тормозной момент которого изменяется при изменении тока в его обмотках возбуждения с помощью регулируемого источника постоянного напряжения. Управление тормозом производится рукояткой «Момент нагрузки электродвигателей», расположенной на панели «Нагрузочные устройства».

Измерение момента на валу и частоты вращения якоря электродвигателя производить измерительными приборами (агрегат № 2), расположенными на приборной панели.

Перед пуском исследуемого электродвигателя необходимо убедиться в том, что:

а) сопротивление пускового реостата полностью введено (ручка пускового реостата находится в крайнем левом положении — цепь якоря двигателя разомкнута);

б) сопротивление реостата в цепи обмотки возбуждения электродвигателя полностью выведено (ручка реостата «Регулировка возбуждения» находится в крайнем правом положении);

в) напряжение, подводимое к цепи обмотки возбуждения электромагнитного тормоза, равно нулю (ручка «Момент нагрузки электродвигателей» находится в крайнем левом положении);

г) значение питающего напряжения электродвигателя установлено равным номинальному его значению $U_{\text{ном}} = 220$ В. Установка питающего напряжения производится кнопками «↑» и «↓» на панели «Нагрузочные устройства» при предварительно нажатой кнопке «Вкл.» на панели «Машины постоянного тока»;

д) нажатием кнопки «Агрегат № 2» на панели «Нагрузочные устройства» включено напряжение питания электрической цепи измерения момента и частоты вращения якоря электродвигателя.

3. Произвести пуск электродвигателя плавным переключением пускового реостата из положения «1» в положение «7» с выдержкой времени в каждом промежуточном положении в течение 1—1,5 с. После окончания

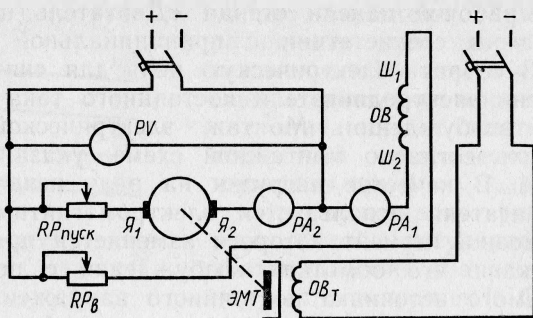


Рис. 14.13

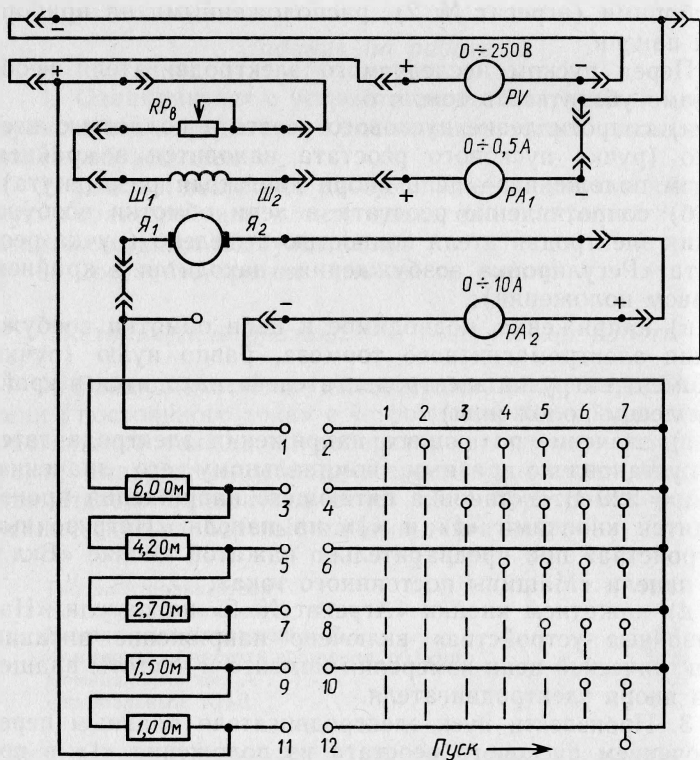


Рис. 14.14

процесса пуска, когда частота вращения якоря двигателя принимает установившееся значение, пусковой реостат полностью должен быть выведен (рукоятка пускового реостата должна быть в крайнем правом положении — положении «7»).

4. Снять механическую $n(M)$, частотную $n(I_{\text{я}})$ и рабочие характеристики электродвигателя — $M(P_2)$, $n(P_2)$, $I_{\text{я}}(P_2)$ и $\eta(P_2)$ при $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и $I_{\text{в}} = I_{\text{в ном}} = \text{const}$:

а) осуществить загрузку электродвигателя с помощью электромагнитного тормоза; изменение момента электромагнитного тормоза должно производиться плавно; в начале опыта устанавливается ток возбуждения, при котором при номинальных питающем напряжении и токе, потребляемом двигателем, частота вращения якоря равна номинальной; это значение тока возбуждения двигателя принимается равным номинальному; в процессе проведения опыта этот ток необходимо поддерживать неизменным;

б) первые точки характеристик снимаются при холостом ходе электродвигателя, т. е. при уменьшенном до нуля моменте электромагнитного тормоза;

в) постепенно нагружая электродвигатель до значения тока, равного $I = 1,2I_{\text{ном}}$, произвести регистрацию показаний всех измерительных приборов для 6—7 точек (включая точку номинального режима). Данные наблюдений записать в табл. 14.1.

Т а б л и ц а 14.1

Номера измерений	Измерения					Вычисления		
	U , В	$I_{\text{я}}$, А	$I_{\text{в}}$, А	n , об/мин	M , Н·м	I , А	P_1 , Вт	P_2 , Вт
1								
2								
...								

5. Обработка результатов измерений:

а) по результатам измерений п. 4 построить механическую $n(M)$ и частотную $n(I_{\text{я}})$ характеристики электродвигателя;

б) по результатам измерений и вычислений п. 4 построить в одной координатной системе рабочие характеристики двигателя, т. е. зависимости момента M ,

частоты вращения якоря n , тока якоря $I_{\text{я}}$ и КПД η от полезной мощности P_2 на валу электродвигателя при постоянном номинальном значении напряжения $U = U_{\text{ном}} = \text{const}$ и постоянном токе возбуждения, равном номинальному его значению.

Вычислить расчетные значения величин: тока, потребляемого электродвигателем,

$$I = I_{\text{я}} + I_{\text{в}};$$

мощности, потребляемой электродвигателем,

$$P_1 = UI;$$

полезной мощности на валу электродвигателя

$$P_2 = 0,105 Mn,$$

где P_2 — мощность, Вт; M — момент, Н·м (1 кГм = 9,81 Н·м); n — частота вращения якоря, об/мин; коэффициента полезного действия электродвигателя

$$\eta = P_2/P_1.$$

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением.

2. Начертите схему электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с пусковой и регулирующей аппаратурой и поясните назначение всех входящих в схему элементов.

3. Почему при уменьшении тока возбуждения электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением частота вращения его якоря возрастает?

4. Как изменить направление вращения электродвигателей постоянного тока с параллельным и последовательным возбуждением?

5. Почему у электродвигателя постоянного тока с параллельным возбуждением с увеличением момента нагрузки на валу возрастает ток якоря?

6. Почему после окончания пуска электродвигателей постоянного тока пусковой реостат должен быть выведен полностью?

7. Как происходит процесс саморегулирования электродвигателей постоянного тока при изменении момента нагрузки на валу?

8. Перечислите способы регулирования частоты вращения электродвигателя постоянного тока.

9. Назовите преимущества электродвигателей постоянного тока различных способов возбуждения.

10. Какое влияние на работу электродвигателей постоянного тока с параллельным и смешанным возбуждением оказывает обрыв параллельной обмотки возбуждения?

Лабораторная работа 15

Трехфазный синхронный генератор

Цель работы. Ознакомление с устройством, работой синхронной машины в режиме генератора, способом синхронизации его и основными характеристиками.

Основные теоретические положения

Электрические машины переменного тока, у которых между числом периодов генерируемого или потребляемого переменного тока и частотой вращения существует жесткая взаимосвязь, называются **синхронными**.

Основными частями синхронной машины являются неподвижный статор 1 и вращающийся ротор 3 (рис. 15.1, а, б). В пазах 2 статора, представляющего

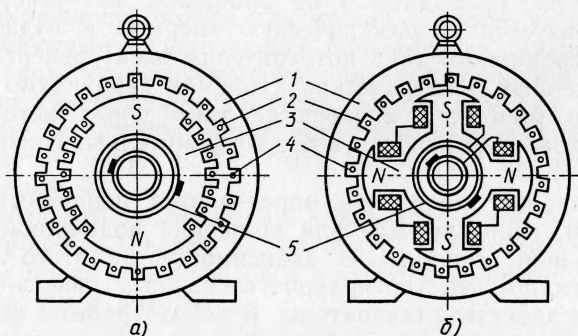


Рис. 15.1

собой цилиндрический магнитопровод, набранный из отдельных листов электротехнической стали, размещаются проводники 4 обмотки статора. В конструктивном отношении статор и обмотка статора синхронной машины принципиально не отличаются от статора и обмотки статора асинхронной машины. Вращающаяся часть синхронной машины — ротор 3 — выполняется с электромагнитами, обмотки 4 которых питаются постоянным током через систему контактных колец 5 и создают необходимое для работы машины вращающееся магнитное поле. Эту часть синхронной машины называют также **индуктором**. В процессе работы синхронной машины в обмотке статора наводится ЭДС, поэтому статор

этой машины является ее якорем. Питание обмотки индуктора синхронной машины осуществляется от независимого источника постоянного тока или от сети переменного тока через специальные выпрямительные устройства. С этой целью для мощных синхронных машин используются относительно небольшие генераторы постоянного тока, так называемые возбuditели, приводимые во вращение от вала синхронной машины.

Мощность возбuditеля зависит от мощности синхронной машины, она обычно составляет 0,5—3% номинального значения ее мощности. Ротор тихоходных синхронных машин выполняют, как правило, с явно выраженными полюсами (рис. 15.1, б), в то время как ротор быстроходных машин выполняется с неявно выраженными полюсами (рис. 15.1, а).

Синхронные машины широко используются в качестве синхронных генераторов переменного тока. При этом механическая энергия, получаемая с вала первичного двигателя, приводящего во вращение вал генератора, преобразуется в электрическую энергию и отдается в сеть переменного тока потребителям электроэнергии. На современных электрических станциях независимо от их типа и мощности в качестве трехфазных источников электроэнергии используются исключительно синхронные генераторы.

Название генератора определяется первичным двигателем, используемым для вращения подвижной части синхронной машины. В зависимости от этого различают гидрогенераторы, турбогенераторы, дизель-генераторы и двигатель-генераторы. В основу работы синхронного генератора положено явление электромагнитной индукции. При включении обмотки возбуждения ротора под напряжение в ее цепи появляется постоянный ток, ротор возбуждается и становится электромагнитом.

При вращении ротора возникает вращающееся магнитное поле электромагнита, магнитные силовые линии которого пересекают проводники обмотки якоря (статора) и в соответствии с законом электромагнитной индукции наводят в этой обмотке ЭДС.

ЭДС, наводимая в каждом проводнике обмотки якоря, зависит от скорости движения проводника v , активной длины проводника l и радиальной составляющей магнитной индукции B_r в воздушном зазоре. ЭДС, наводимую в проводнике в каждый момент времени, с учетом количественной взаимосвязи всех факторов нахо-

дят из выражения

$$e = B_r l v.$$

Так как синхронный генератор предназначен для получения синусоидальной ЭДС, то в каждом из проводников обмотки якоря также должна возникать элементарная синусоидальная ЭДС.

При постоянной скорости вращения ротора, как это следует из приведенной формулы, для обеспечения синусоидальной ЭДС необходимо, чтобы магнитный поток (или магнитная индукция), сцепленный с проводником, также изменялся во времени по синусоидальной зависимости. В реальных условиях это достигается в результате обеспечения синусоидального распределения магнитной индукции в воздушном зазоре машины путем создания соответствующей формы полюсных наконечников для синхронных машин с явно выраженными полюсами и соответствующего распределения обмотки возбуждения вдоль окружности ротора для машин с неявно выраженными полюсами. Подавляющее большинство синхронных генераторов, используемых на практике, является трехфазными генераторами. В этом случае обмотка якоря (статора) генератора выполняется трехфазной. Соединение обмотки якоря может быть выполнено звездой или треугольником.

Частота ЭДС, наводимой в каждой фазе обмотки якоря синхронного генератора, находится в строгой зависимости от числа пар полюсов p и частоты вращения (числа оборотов) n ротора:

$$f = pn/60.$$

ЭДС, наводимая в каждой фазе обмотки якоря синхронной машины, так же как и для асинхронной машины, зависит от магнитного потока индуктора

$$E = 4,44k_0 f \omega \Phi_m,$$

где k_0 — обмоточный коэффициент обмотки статора (якоря); ω — число витков одной фазы обмотки статора; Φ_m — амплитудное значение магнитного потока одной пары полюсов индуктора.

Одной из важнейших характеристик синхронного генератора является характеристика холостого хода, которая фактически является магнитной характеристикой синхронного генератора. Она снимается при отключенной цепи нагрузки (потребителя электроэнергии), т. е. в ре-

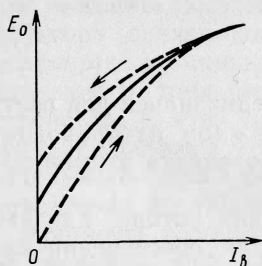


Рис. 15.2

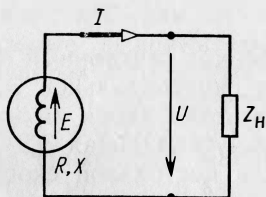


Рис. 15.3

жиме холостого хода. Характеристика холостого хода представляет собой зависимость $E_0(I_b)$, т. е. зависимость ЭДС холостого хода от тока возбуждения (намагничивающего тока) индуктора синхронного генератора при постоянной частоте вращения $n = \text{const}$ (при постоянной частоте генерируемой ЭДС $f = \text{const}$) и токе нагрузки $I = 0$ (при разомкнутой внешней цепи якоря).

Опытная характеристика холостого хода синхронного генератора (рис. 15.2), так же как и характеристика холостого хода машины постоянного тока, представляется двумя ветвями, что обусловлено влиянием явления гистерезиса магнитной системы машины. С увеличением потерь мощности в магнитопроводе на гистерезис раздвоение ветвей становится более значительным.

Современные электротехнические стали, применяемые для магнитопровода электрических машин, характеризуются незначительными потерями мощности на гистерезис, вследствие чего расхождение ветвей характеристики холостого хода оказывается небольшим. Поэтому она представляется обычно в виде некоторой усредненной зависимости, как это показано на рис. 15.2 сплошной кривой.

Из характеристики холостого хода видно, что с увеличением намагничивающего тока I_b ЭДС синхронного генератора E_0 возрастает почти по линейному закону. Наклон характеристики зависит от воздушного зазора, увеличиваясь с увеличением последнего.

В процессе дальнейшего возрастания тока возбуждения происходит насыщение магнитной системы машины и, как следствие этого, увеличение потоков рассеяния, в результате чего происходит снижение нарастания наводимой ЭДС. При этом линейность характеристики холостого хода нарушается и происходит значительное

ее искривление. Однако при дальнейшем насыщении магнитной системы машины соответствующий этому участок характеристики холостого хода снова становится линейным, но уже с небольшим наклоном относительно оси абсцисс, подобно тому, как это наблюдается в магнитных системах без ферромагнитных сердечников.

При подключении потребителя электрической энергии к обмоткам якоря синхронного генератора в его цепи возникает ток нагрузки. При этом синхронная машина начинает работать как источник, преобразуя механическую энергию, получаемую от первичного двигателя, в электрическую, отдавая ее в сеть потребителю электроэнергии. При рассмотрении процессов, происходящих при работе, каждую фазу синхронного генератора можно рассматривать как некоторый условный однофазный генератор синусоидального напряжения, к зажимам которого подключена нагрузка, имеющая в общем случае комплексный характер (рис. 15.3). В рассматриваемом режиме синхронная машина работает в качестве источника, поэтому ЭДС E и ток нагрузки I совпадают по направлению. При заданных положительных направлениях в соответствии со вторым законом Кирхгофа уравнение электрического равновесия для схемы (рис. 15.3) можно записать в комплексной (векторной) форме

$$\dot{E} = \dot{U} + RI + jXI,$$

где E — ЭДС, наводимая в фазе обмотки якоря синхронного генератора при нагрузке; I — ток нагрузки; $U = Z_{\Sigma}I$ — напряжение на зажимах синхронного генератора, равное произведению тока нагрузки на полное сопротивление фазы потребителя электроэнергии; R — активное сопротивление фазы обмотки якоря (статора); X — синхронное индуктивное сопротивление фазы обмотки якоря.

Активное сопротивление якоря R синхронной машины обычно невелико, причем $R \ll X$, вследствие чего активное падение напряжения на обмотке якоря имеет также относительно небольшое значение, поэтому влиянием его можно пренебречь, считая $R = 0$.

С учетом этого уравнение электрического равновесия приводится к более простому виду: $\dot{E} = \dot{U} + jXI$.

В соответствии с этим уравнением построена упрощенная векторная диаграмма синхронного генератора (рис. 15.4) для активно-индуктивного характера нагрузки.

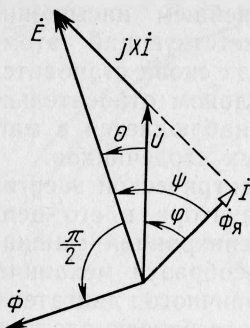


Рис. 15.4

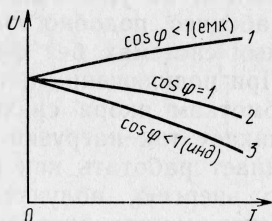


Рис. 15.5

Из векторной диаграммы видно, что вектор ЭДС \dot{E} опережает вектор напряжения \dot{U} на зажимах генератора на угол θ . При этом с увеличением тока нагрузки этот угол увеличивается, вследствие чего угол θ называется углом нагрузки синхронной машины.

Важной характеристикой синхронного генератора является внешняя характеристика $U(I)$, т. е. зависимость напряжения U на зажимах генератора от тока нагрузки I (тока якоря), при постоянных значениях тока возбуждения ($I_b = \text{const}$), коэффициента мощности ($\cos \varphi = \text{const}$) и частоты вращения ротора ($n = \text{const}$).

Математическое выражение для внешней характеристики (рис. 15.5) можно получить, исходя из приведенного выше уравнения электрического равновесия, если его записать относительно напряжения на зажимах генератора:

$$\dot{U} = \dot{E} - R\dot{I} - jX\dot{I},$$

откуда следует, что при отсутствии тока нагрузки в цепи якоря ($I=0$) падение напряжения на обмотках генератора равно нулю. При этом напряжение в режиме холостого хода оказывается равным значению ЭДС холостого хода, т. е. $U = E_0$. Если принять, что ЭДС E синхронного генератора с изменением нагрузки не изменяется, т. е. $E = E_0 = \text{const}$, то согласно приведенному уравнению при увеличении тока нагрузки должно происходить снижение напряжения на зажимах генератора. Однако в реальных условиях снижение напряжения происходит не только за счет падения напряжения на сопротивлениях обмотки якоря, но также и вследствие влияния реакции якоря, т. е. влияния магнитного

потока якоря на основной поток машины. В процессе работы синхронной машины магнитный поток Φ индуктора относительно обмотки ротора остается неподвижным и неизменным. В то же время относительно обмотки каждой фазы якоря (статора) этот поток изменяется во времени по синусоидальному закону. Вследствие этого ЭДС E , наводимая в обмотке якоря синхронного генератора, отстает по фазе от потока Φ , который ее создает, на угол $\pi/2$ (см. рис. 15.4).

Пренебрегая влиянием относительно небольших потерь мощности в магнитопроводе якоря, можно считать, что магнитный поток якоря $\Phi_{\text{я}}$ совпадает по фазе с током якоря I , который этот поток создает.

Уменьшение основного магнитного потока синхронной машины вследствие влияния реакции якоря приводит к уменьшению наводимой в обмотке якоря ЭДС, которая для нагруженного синхронного генератора не равна его ЭДС холостого хода E_0 . При активно-индуктивном характере нагрузки, когда потребитель электроэнергии обладает не только активным, но и индуктивным сопротивлением, $\cos \varphi < 1$ (индуктивный), с увеличением нагрузки снижается напряжение на зажимах синхронного генератора за счет падения напряжения в обмотке якоря и влияния реакции якоря.

Внешние характеристики синхронного генератора с учетом характера нагрузки показаны на рис. 15.5. Во многих практических случаях необходимо иметь напряжение на зажимах синхронного генератора, не изменяющимся с изменением нагрузки ($U = \text{const}$). Для этого с изменением тока нагрузки с целью компенсации реакции якоря и падения напряжения на его обмотках применяют регулирование тока возбуждения машины, так как с изменением тока $I_{\text{в}}$ изменяется поток, ЭДС, а следовательно, и напряжение на зажимах генератора.

Регулировочная характеристика является зависимостью между токами возбуждения $I_{\text{в}}$ и нагрузки I при постоянной частоте вращения $n = \text{const}$ и $\cos \varphi = \text{const}$ потребителя электроэнергии, при которой в процессе работы обеспечивается постоянство напряжения на зажимах синхронного генератора $U = \text{const}$.

Регулировочные характеристики при различных характерах нагрузки представлены на рис. 15.6. С изменением нагрузки синхронного генератора вследствие изменения составляющих потерь мощности в нем происходит и изменение КПД. С уменьшением нагрузки ниже

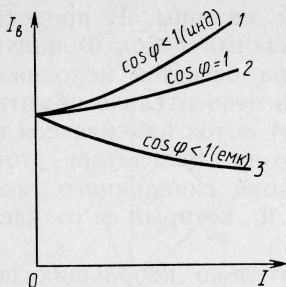


Рис. 15.6

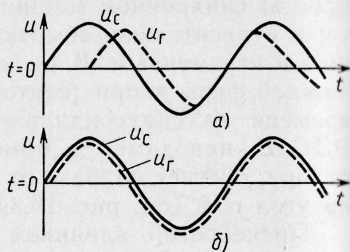


Рис. 15.7

номинальной происходит уменьшение КПД синхронного генератора.

КПД современных синхронных генераторов высок и достигает значений порядка 96—98 %, увеличиваясь с увеличением номинальной мощности машины. Характер нагрузки также существенно влияет на КПД синхронного генератора, который уменьшается с уменьшением $\cos \varphi$ потребителя электроэнергии.

Синхронные генераторы в качестве автономных источников переменного тока применяются редко. Чаще они используются для работы на электрические сети, питаемые другими синхронными генераторами (например, генераторами электростанций).

Включение синхронных генераторов на параллельную работу с сетью или параллельно с другими синхронными генераторами связано с определенными трудностями. При этом недопустимо вновь вводимый в действие синхронный генератор подсоединять к уже работающим синхронным генераторам произвольным включением его в сеть.

Это связано с тем, что в момент включения ЭДС синхронного генератора значительно отличается от напряжения сети. В результате между зажимами сети и зажимами генератора возникает разность потенциалов (рис. 15.7, а), которая при замыкании электрической цепи может привести к появлению уравнивающего тока якоря, подобно тому, как это имеет место при параллельном включении источников с разными по величине ЭДС. В процессе взаимодействия больших токов якоря с основным магнитным потоком возникают значительные механические усилия, которые могут явиться причиной деформации обмоток и выхода синхронной машины из строя.

Обеспечение безаварийной работы синхронного генератора при включении на параллельную работу достигается в процессе предварительной его подготовки. Создание условий, при которых допустимо включение синхронной машины в сеть, обеспечивается синхронизацией.

Процесс синхронизации генератора состоит в том, чтобы синусоида напряжения сети в момент включения точно совпадала с синусоидой напряжения синхронного генератора. При обеспечении этого условия подключение синхронного генератора к сети не изменяет электрического состояния системы и не вызывает уравнивающих токов якоря, так как в любой момент времени разность мгновенных значений напряжения сети и напряжения генератора оказывается равной нулю (рис. 15.7, б). В этом случае включение синхронного генератора параллельно с сетью равноценно присоединению еще одного источника к системе параллельно включенных источников в режиме холостого хода.

Для этого необходимо выполнить следующие условия: а) частота напряжения сети и частота напряжения генератора должны быть одинаковыми, т. е. $f_c = f_r$; б) действующее значение напряжения сети должно быть равно действующему значению напряжения генератора, т. е. $U_c = U_r$ (выполнение этого условия обеспечивает и равенство соответствующих амплитудных значений, т. е. $U_{mc} = U_{mr}$); в) фаза напряжения сети также должна быть одинаковой с фазой напряжения генератора, т. е. $\psi_c = \psi_r$; г) чередование фаз сети и генератора должно быть одинаковым.

В процессе подготовки синхронного генератора для включения на параллельную работу с сетью применяются различные схемы контроля условий синхронизации. Наиболее часто применяется схема, представленная на рис. 15.8.

Требование в отношении чередования фаз на практике обычно выполняется в процессе монтажа и наладки синхронного генератора. Для этого определяют фазы A_r , B_r и C_r синхронных генераторов и соответствующие фазы A_c , B_c и C_c трехфазной сети и присоединяют их к одноименным контактам выключателя B_1 , при включении которого обеспечивается требуемое чередование фаз синхронного генератора и сети (рис. 15.8).

С помощью вспомогательного двигателя постоянного тока $ДП$, соединенного с валом синхронного генератора,

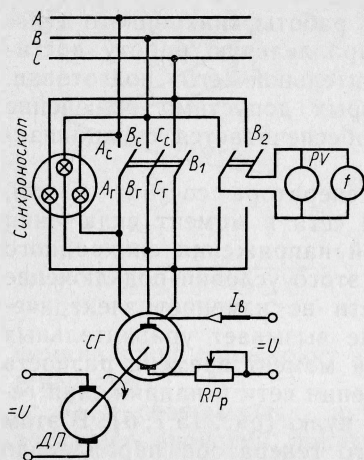


Рис. 15.8

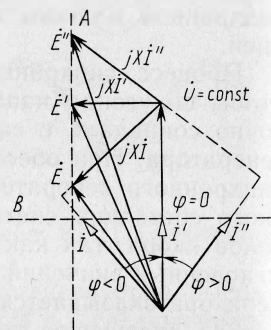


Рис. 15.9

частота его вращения доводится до синхронной частоты, с тем чтобы частота наводимой в якоре генератора ЭДС была равной частоте сети. Контроль за соблюдением этого условия осуществляется с помощью частотомера f , путем периодического замера частоты напряжений сети и генератора. После обеспечения равенства частот $f_r = f_c$, путем изменения тока возбуждения I_b синхронной машины напряжение на ее зажимах доводится до значения, равного напряжению сети, т. е. $U_r = U_c$. Проверка выполнения этого условия осуществляется с помощью вольтметра PV , включенного параллельно с частотомером. Затем с помощью лампового синхроскопа, состоящего из трех ламп накаливания, включенных между одноименными, в отношении последовательности фаз, зажимами сети и генератора, проверяется условие совпадения по фазе напряжений сети и генератора. Из схемы рис. 15.8 видно, что лампы синхроскопа включают-ся в расщепки фаз A , B и C , поэтому реагируют на разность потенциалов между одноименными зажимами сети и генератора при отключенном выключателе B_1 . При совпадении фаз и частоты сети и генератора лампы гореть не будут.

Если синусоида напряжения сети и синусоида напряжения генератора не совпадают во времени, возникает разность потенциалов и лампы загораются. В процессе синхронизации лампы синхроскопа периодически заго-

раются и гаснут. Чем меньше разница в частотах, тем медленнее происходит колебание света ламп синхроскопа. С приближением момента совпадения частот промежутки между вспышками ламп увеличиваются и при достаточно большом промежутке времени между вспышками в момент погасания ламп производится включение синхронного генератора в сеть выключателем B_1 . Полной синхронизации машины обычно трудно достигнуть, поэтому в момент включения в сеть вследствие некоторой неточности синхронизации в обмотках якоря синхронного генератора все же появляются относительно небольшие уравнивающие токи. Протекая по обмоткам якоря, они создают вращающееся магнитное поле якоря, которое, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем полюсов ротора, обеспечивает точную синхронизацию. Таким образом, с помощью синхроскопа осуществляется контроль точного совпадения частоты и фазы напряжения сети и генератора, причем равенство частоты и фаз напряжений в процессе синхронизации достигается подрегулировкой частоты вращения вспомогательного двигателя ДП. В производственных условиях ввиду сложности процесса синхронизации этот процесс выполняют автоматически с применением соответствующей аппаратуры.

Для обеспечения нагрузки синхронного генератора необходимо увеличить момент вращения, приложенный к его валу со стороны вспомогательного двигателя постоянного тока ДП путем уменьшения его тока возбуждения. Это вызывает уменьшение магнитного потока этого двигателя, а следовательно, и наводимой в обмотке его якоря ЭДС, что приводит к увеличению тока якоря и вращающегося момента двигателя постоянного тока, выполняющего роль первичного двигателя. При этом возрастает ток статора и синхронный генератор нагружается. В некоторых случаях возможна работа синхронного генератора при постоянной мощности $P = \text{const}$ и изменении тока возбуждения полюсов ротора при $U = \text{const}$ и $f = \text{const}$.

Свойства синхронного генератора при работе в этих условиях представляется возможным выяснить в результате анализа его упрощенной векторной диаграммы, представленной на рис. 15.9. ЭДС E синхронной машины, как известно, находится в зависимости от магнитного потока, который зависит от тока возбуждения ее полюсов, причем большему току возбуждения в пределах

рабочей части характеристики соответствует и большее значение ЭДС.

При изменении тока возбуждения I_b и $U = \text{const}$ происходит нарушение электрического равновесия системы, которое в соответствии с приведенным ранее уравнением может быть восстановлено только в результате изменения тока I якоря ($X = \text{const}$). Из этого следует, что при изменении тока возбуждения должно происходить и изменение положения \vec{E} и jXI на векторной диаграмме, вследствие чего она изменяет свой вид (рис. 15.9). Работа синхронного генератора протекает при постоянном значении мощности синхронной машины

$$P = \frac{mU}{X} E \sin \theta.$$

Отсюда следует, что при работе с $P = \text{const}$ должно обеспечиваться условие, при котором произведение $E \sin \theta = \text{const}$, так как все другие значения, входящие в данное выражение, являются константами. Это означает, что при этом проекция вектора ЭДС \vec{E} на ось абсцисс должна оставаться постоянной. Из векторной диаграммы видно, что для обеспечения $E \sin \theta = \text{const}$ при изменении тока возбуждения I_b в заданных условиях конец вектора \vec{E} должен перемещаться по прямой A , параллельной вектору напряжения \vec{U} .

Активную мощность синхронной машины можно представить в виде выражения $P = mUI \cos \varphi$. Из этой формулы видно, что при $P = \text{const}$ и изменении тока возбуждения активная составляющая тока якоря также должна оставаться постоянной, т. е. $I_a = I \cos \varphi = \text{const}$. Это значит, что при изменении тока якоря в процессе изменения тока возбуждения проекция тока якоря на вектор напряжения должна оставаться постоянной, что может быть достигнуто, если конец вектора \vec{I} , изменяясь, будет перемещаться по прямой B , перпендикулярной вектору напряжения \vec{U} . Явления, происходящие при изменении тока возбуждения синхронного генератора в заданных условиях, иллюстрируются векторной диаграммой (см. рис. 15.9). При некотором значении тока возбуждения I_b генератор возбуждает ЭДС, значение которой равно E . При увеличении тока возбуждения до значения I'_b происходит возрастание ЭДС до значения E' . Дальнейшее возрастание тока возбуждения до I''_b приводит к увеличению ЭДС до значения E'' . Как видно из диаграммы, изменяясь по величине в соот-

ветствии с условием $P = \text{const}$, конец вектора \vec{E} перемещается по прямой A .

Однако изменение ЭДС не должно приводить к нарушению условия электрического равновесия, в соответствии с которым вектор ЭДС \vec{E} должен быть равен векторной сумме напряжения \vec{U} и реактивного падения напряжения jXI . Это обеспечивается тем, что при изменении ЭДС происходит изменение падения напряжения

jXI , вектор которого всякий раз оказывается замыкающим между концами векторов \vec{U} и \vec{E} . Причем изменение реактивного падения напряжения jXI свидетельствует о том, что происходит изменение тока якоря I синхронного генератора, так как синхронное сопротивление $X = \text{const}$.

Положение векторов тока якоря на векторной диаграмме легко определить, так как известно, что каждому падению напряжения соответствует ток якоря, отстающий от него по фазе на угол $\pi/2$, с учетом того, что конец вектора тока I якоря каждый раз должен находиться на прямой B . С изменением тока якоря происходит изменение и угла φ между током и напряжением, а следовательно, коэффициента мощности $\cos \varphi$ синхронного генератора.

Представив эту зависимость в виде графика, можно получить так называемую U -образную кривую и кривую коэффициента мощности (рис. 15.10).

Из кривых рис. 15.10 и векторной диаграммы рис. 15.9 видно, что с изменением тока возбуждения I_b происходит изменение сдвига тока по фазе относительно напряжения. При этом возможно такое значение тока возбуждения, при котором ток якоря и напряжение совпадают по фазе ($\cos \varphi = 1$). В этом случае ток якоря имеет минимальное значение. При этом имеют место минимальные потери мощности не только в проводниках обмотки якоря синхронного генератора, но и в проводах, соединяющих генератор с потребителем электроэнергии. Этому соответствует работа синхронного генератора при номинальном возбуждении. Из векторной диаграммы (см. рис. 15.9) также видно, что при малых токах возбуждения (соответственно при малых значениях ЭДС E)

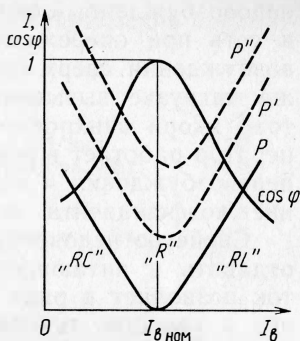


Рис. 15.10

недовозбужденный синхронный генератор отдает энергию в сеть при опережающем токе якоря. Увеличение тока возбуждения сверх его номинального значения при той же нагрузке вызывает появление отстающего по фазе тока якоря синхронного генератора. В этом случае генератор работает в режиме перевозбуждения. В режимах перевозбуждения и недовозбуждения происходит снижение коэффициента мощности синхронного генератора.

Свойство недовозбужденного синхронного генератора отдавать в питающую сеть опережающий (емкостной) ток позволяет в ряде случаев наряду с использованием его в качестве генератора активной мощности использовать его и в качестве генератора реактивной (емкостной) мощности и тем самым улучшать коэффициент мощности всей системы электроснабжения.

Значение активной составляющей тока якоря определяется нагрузкой, т. е. активной мощностью, отдаваемой синхронным генератором в сеть. Поэтому U -образная кривая с увеличением активной мощности, отдаваемой генератором в сеть, соответственно располагается выше над осью абсцисс ($P'' > P' > P$).

Задание по работе

1. Ознакомиться с конструкцией трехфазного синхронного генератора на демонстрационном стенде и с лабораторной установкой для испытания синхронного генератора.

2. Снять характеристику холостого хода синхронного генератора при синхронной частоте вращения его якоря.

3. Произвести синхронизацию трехфазного синхронного генератора для параллельной работы с трехфазной питающей сетью.

4. Снять U -образную характеристику синхронного генератора.

5. Снять зависимость тока и коэффициента мощности от мощности, отдаваемой синхронным генератором в питающую сеть.

6. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с устройством синхронной машины, установленной на агрегате № 2 лабораторного стенда и

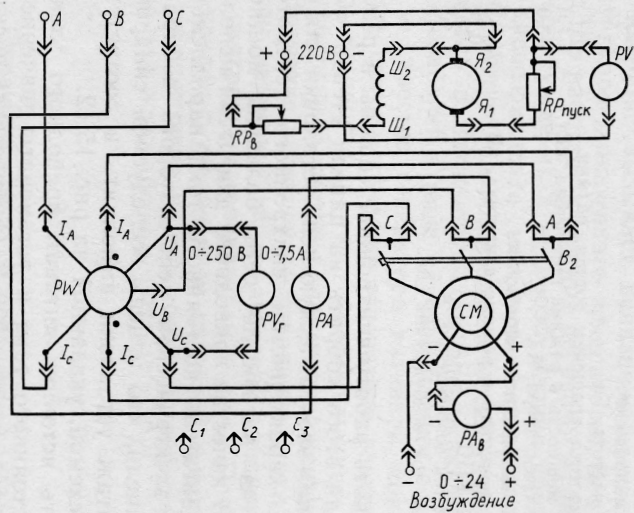
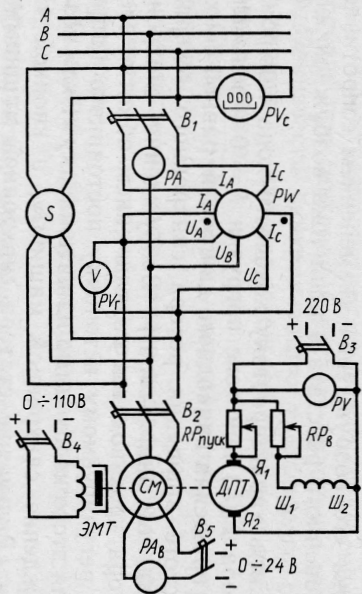
демонстрационном стенде. Записать технические паспортные данные:

Номинальное напряжение, В	220
Номинальная частота, Гц	50
Синхронная частота вращения ротора, об/мин	3000
Номинальная мощность в режиме генератора, кВт	1,0
Номинальный ток статора, А	3,0
Номинальный коэффициент мощности	0,8
Номинальная мощность в режиме двигателя, кВт	0,7
Номинальный КПД	0,78
Номинальный ток возбуждения, А	2,0
Максимальный ток возбуждения, А	6,0

2. Исследовать работу синхронной машины в режиме генератора. Для этого собрать на панели стенда «Синхронная машина» электрическую цепь установки для снятия основных характеристик синхронного генератора, работающего на питающую сеть большой мощности (рис. 15.11). В качестве приводного двигателя использовать электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения, электрическая цепь которого собирается на той же панели, что и цепь исследуемой синхронной машины. Монтаж установки выполнить в соответствии с монтажной схемой, указанной на рис. 15.12.

3. Включить источник питания приводного электродвигателя постоянного тока и установить значение напряжения питания равным 220 В. Осуществить пуск двигателя постоянного тока и установить частоту вращения его якоря $n = 3000$ об/мин. Изменение частоты вращения приводного электродвигателя производить изменением тока его возбуждения (изменением сопротивления регулировочного реостата в цепи тока возбуждения двигателя).

4. Снять характеристику холостого хода синхронного генератора $E_0(I_v)$ при токе нагрузки $I = 0$ и неизменной частоте вращения приводного двигателя, равной синхронной частоте вращения ротора синхронного генератора ($n = 3000$ об/мин = const). Возбуждение синхронного генератора производится подключением обмотки его ротора к регулируемому источнику постоянного напряжения. Для этого необходимо нажать кнопку «Вкл» позиции «Возбуждение синхронной машины», а кнопкой «Вкл» позиции «Включение статора синхронной машины» подключить к обмотке статора вольтметр и соответствующие электрические цепи синхроноскопа. Регулировка тока возбуждения синхронной машины производится регули-



Т а б л и ц а 15.1

Номера измерений	1	2	3	4	5	6	7
$I_{\text{в}}, \text{ A}$							
$E_0, \text{ В}$							

ровочным устройством на панели «Синхронная машина». Затем, изменяя ток возбуждения от нуля до значения, при котором напряжение на зажимах синхронного генератора составляет $U = 1,25 U_{\text{ном}}$, произвести шесть-семь измерений. Первая точка отчета производится при разомкнутой цепи возбуждения синхронного генератора.

Данные измерений занести в табл. 15.1.

5. Установить напряжение на зажимах синхронного генератора равным напряжению питающей сети: $U_{\text{г}} = U_{\text{с}}$. Регулируя частоту вращения приводного электродвигателя постоянного тока, по синхроскопу установить момент синхронизации частоты ЭДС синхронного генератора и напряжения сети. Момент синхронизации соответствует совмещению стрелки синхроскопа с вертикальной отметкой его шкалы (т. е. совпадению фаз напряжений генератора и сети). Затем в момент синхронизации подключить синхронный генератор на параллельную работу с сетью, нажав кнопку «Вкл» позиции «Включение к сети синхронной и асинхронной машины».

6. Снять U -образную характеристику синхронного генератора, т. е. зависимость тока I , отдаваемого генератором при параллельной работе с сетью, от его тока возбуждения $I_{\text{в}}$ при постоянных — мощности $P = \text{const}$ и напряжении $U = \text{const}$:

а) по показаниям трехфазного ваттметра и амперметра установить при мощности $P = 0,5 P_{\text{ном}} = \text{const}$ минимальный ток нагрузки синхронного генератора, изменяя его ток возбуждения (первая точка зависимости $I(I_{\text{в}})$ — при $P = \text{const}$);

б) увеличивая ток возбуждения синхронного генератора, повысить его ток нагрузки до номинального значения $I_{\text{ном}}$. При этом снять еще две, три точки характеристики; аналогично снимаются две, три точки характеристики изменением тока возбуждения синхронного генератора в сторону его уменьшения по сравнению с начальным значением; в процессе проведения опыта мощность, отдаваемая синхронным генератором в сеть $P = 0,5 P_{\text{ном}}$, поддер-

Таблица 15.2

Номера измерений	1	2	3	4	5	6	7
U , В							
$I_{\text{в}}$, А							
I , А							
$\cos\varphi$							
P , Вт							

Таблица 15.3

Номера измерений	Измерения				Вычисления
	U , В	I , А	$I_{\text{в}}$, А	P , Вт	$\cos\varphi$
1					
2					
...					

живается неизменной, что достигается изменением тока возбуждения приводного электродвигателя постоянного тока.

Результаты измерений записать в табл. 15.2;

в) нагрузить синхронный генератор активной мощностью при номинальном неизменном токе возбуждения генератора $I_{\text{в ном}} = 2\text{А} = \text{const}$ путем уменьшения тока возбуждения приводного электродвигателя постоянного тока. Изменяя ток статора синхронного генератора (в пределах номинального значения), произвести шесть-семь измерений напряжения на зажимах синхронного генератора, тока статора и мощности, отдаваемой генератором в сеть. Результаты измерений записать в табл. 15.3.

7. Обработка результатов опытов.

По результатам измерений и вычислений:

а) по результатам измерений п. 4 построить характеристику холостого хода синхронного генератора $E_0(I_{\text{в}})$;

б) построить U -образную характеристику синхронного генератора, т. е. $I(I_{\text{в}})$, $\cos\varphi(I_{\text{в}})$ при постоянной актив-

ной мощности, отдаваемой в сеть $P = \text{const}$; построение выполнить в одной координатной системе, а коэффициент мощности вычислить по измеренным данным $\cos\varphi = P/\sqrt{3} UI$, где P — мощность, отдаваемая синхронным генератором в сеть; U , I — линейные напряжение и ток генератора (значения P , U и I взять из табл. 15.2);

в) по измеренным и вычисленным данным из табл. 15.3 построить зависимости $I(P)$ и $\cos\varphi(P)$ в одной координатной системе.

Контрольные вопросы

1. Поясните устройство и принцип действия трехфазного синхронного генератора.
2. Объясните назначение синхроскопа.
3. Укажите, какие условия необходимо выполнить при включении синхронного генератора на параллельную работу с питающей сетью.
4. Поясните, чем определяется частота вращения приводного электродвигателя синхронного генератора при заданной частоте напряжения на его зажимах.
5. Как изменяется ток якоря синхронного генератора с изменением его тока возбуждения при неизменной отдаваемой мощности и неизменном напряжении?
6. Как изменить активную мощность синхронного генератора при включении его на работу параллельно с питающей сетью?
7. Как изменить реактивную мощность синхронного генератора при работе его параллельно с питающей сетью?
8. Как поддерживать неизменным напряжение на зажимах синхронного генератора при изменении значения и характера нагрузки?
9. Каким образом синхронный генератор может быть использован в качестве компенсирующего устройства (синхронного компенсатора) для повышения коэффициента мощности потребителя электроэнергии?
10. Как осуществляется переход синхронной машины от генераторного режима к двигательному режиму?

Лабораторная работа 16

Трехфазный синхронный электродвигатель

Ц е л ь р а б о т ы. Ознакомление с устройством и основными характеристиками трехфазного синхронного электродвигателя.

Основные теоретические положения

Синхронные машины, так же как и другие электрические машины, обратимы, т. е. могут работать в режимах генератора и двигателя. Поэтому конструкция синхронного электродвигателя практически ничем не отличается от конструкции синхронного генератора.

При использовании в качестве электродвигателя синхронная машина потребляет электрическую энергию из питающей сети и преобразует ее в механическую. По сравнению с асинхронными электродвигателями синхронные имеют ряд существенных преимуществ, особенно при незначительных частотах вращения и больших мощностях машин.

Синхронные электродвигатели могут быть трех- и однофазными. Наиболее распространены трехфазные синхронные двигатели, работа которых основана на взаимодействии поля постоянных магнитов (электромагнитов) ротора с вращающимся магнитным полем, создаваемым обмоткой якоря (статора).

В большинстве практических случаев синхронные электродвигатели выполняют явнополюсными (они относятся к категории тихоходных).

Частота вращения синхронных электродвигателей, в отличие от асинхронных строго постоянна и зависит только от частоты f питающего напряжения и числа пар полюсов p двигателя: $n = 60f/p$.

При включении обмотки статора синхронного электродвигателя в трехфазную сеть, так же как в асинхронном двигателе, возникает вращающееся магнитное поле, частота вращения которого определяется приведенным выражением.

Однако при подаче постоянного тока в обмотку ротора последний не сдвинется с места и останется в неподвижном состоянии, так как синхронный электродвигатель имеет пусковой момент, равный нулю. Объясняется это тем, что вращающий момент синхронного электродвигателя, так же как и любой другой электрической машины, создается в результате взаимодействия магнитного поля статора с магнитным полем полюсов ротора. При нормальной работе синхронного электродвигателя его ротор вращается с частотой вращающегося магнитного поля статора. При этом равноименные полюса полей статора и ротора, притягиваясь друг к другу, оказываются как бы сцепленными между собой через воздушный зазор машины. Магнитное поле статора при вращении увлекает за собой полюса ротора и заставляет их вращаться с той же частотой вращения, что и вращающееся магнитное поле.

В момент пуска ротор синхронного двигателя находится в неподвижном состоянии. Вращающееся же магнитное поле статора безынерционно и при включении обмотки якоря мгновенно приобретает частоту вращения, равную

синхронной частоте вращения $n = 60f/p$. Вращаясь относительно полюсов неподвижного ротора, вращающееся магнитное поле создает знакопеременный момент. При этом возникает вращающее усилие в направлении вращающегося поля или в противоположном ему направлении. Так как ротор синхронного двигателя характеризуется определенной массой, а следовательно, обладает инерцией, то под действием знакопеременного момента он не в состоянии мгновенно сдвинуться с места и приобрести синхронную частоту вращения. В результате синхронный электродвигатель не придет во вращение и будет стоять на месте. Поэтому пуск синхронного двигателя осуществляется с применением специальных пусковых устройств.

В практике наиболее широко распространены следующие способы пуска: а) пуск синхронного двигателя с помощью вспомогательного электродвигателя; б) асинхронный пуск синхронного электродвигателя.

При пуске по первому способу ротор синхронного двигателя с возбужденными полюсами с помощью другого, предназначенного для этого вспомогательного электродвигателя доводится до частоты вращения ротора, равной или близкой к синхронной частоте вращения. При этом разноименные полюса ротора и поля статора, неподвижные относительно друг друга в пространстве, притягиваются через воздушный зазор машины. Ротор входит в синхронизм и далее вращается самостоятельно с частотой вращающегося магнитного поля. Вспомогательный электродвигатель оказывается при этом ненужным и его можно отключить от сети. В качестве вспомогательного двигателя обычно используется электродвигатель постоянного тока. Для этого также можно использовать и асинхронный электродвигатель с соответствующим числом пар полюсов.

Недостатком рассмотренного способа пуска является относительная сложность процесса пуска и необходимость применения вспомогательного электродвигателя, который после окончания пуска оказывает некоторое тормозное воздействие на синхронный двигатель и тем самым снижает КПД установки. Учитывая это, в ряде случаев после окончания пуска вспомогательный двигатель с помощью специального устройства отключается от вала синхронного электродвигателя. В отдельных случаях в качестве вспомогательного двигателя при пуске используется возбуждатель синхронного двигателя.

В современных условиях чаще применяется так называемый асинхронный пуск синхронного электродвигателя,

лишенный указанных недостатков. Сущность этого способа заключается в том, что в полюсных наконечниках ротора синхронного двигателя укладывается дополнительная короткозамкнутая обмотка ротора, выполняющая ту же роль, что и обмотка ротора асинхронного электродвигателя.

При включении обмотки статора синхронного двигателя в трехфазную сеть в магнитопроводе и воздушном зазоре машины создается вращающееся магнитное поле. Это поле наводит в короткозамкнутой обмотке неподвижного ротора переменный ток, который, взаимодействуя с вращающимся магнитным полем, создает вращающий момент, приводящий ротор во вращение в направлении вращающегося магнитного поля.

Происходит нарастание частоты вращения ротора синхронного двигателя, которая после окончания разгона достигает значения, близкого к синхронной частоте вращения, так как процесс пуска синхронного двигателя происходит в режиме холостого хода, без нагрузки. Затем включается питание обмотки ротора синхронного электродвигателя. Полюса ротора возбуждаются и в результате взаимодействия магнитных полей статора и ротора синхронный электродвигатель входит в синхронизм. После окончания пуска относительная скорость перемещения проводников короткозамкнутой обмотки ротора в магнитном поле оказывается равной нулю. Ток в этой обмотке уменьшается до нуля и при дальнейшей работе синхронного двигателя с синхронной частотой вращения короткозамкнутая обмотка ротора не оказывает воздействия на работу синхронного двигателя, так как момент вращения, создаваемый с ее помощью, также равен нулю.

При появлении толчков, возможных при сбросе и нарастании нагрузки на валу синхронного двигателя, когда происходит кратковременное скачкообразное изменение частоты вращения ротора в результате изменения угла нагрузки θ , в короткозамкнутой обмотке ротора возникает ток, который, взаимодействуя с полем статора, будет создавать момент, препятствующий изменению частоты вращения. В этом случае вспомогательная короткозамкнутая обмотка ротора выполняет роль своеобразного демпфера, сглаживающего толчки нагрузки.

Преимуществом рассматриваемого способа пуска синхронного двигателя является его простота. В этом случае пуск производится простым включением в питающую сеть синхронного двигателя. К недостаткам этого способа сле-

дует отнести то, что при пуске в обмотке статора синхронного двигателя возникают значительные пусковые токи, которые могут вызвать заметное снижение напряжения в питающей сети, что неблагоприятно отразится на работе других электрических машин и потребителей электроэнергии, питающихся от той же сети электроснабжения. Для уменьшения пускового тока пуск синхронных электродвигателей производят при пониженном напряжении. С этой целью при пуске используют автотрансформаторы или включают реакторы последовательно с обмоткой статора. При пуске синхронных двигателей малой мощности, а также при небольших напряжениях иногда осуществляют пуск с переключением обмотки статора со звезды на треугольник.

После окончания пуска электродвигатель может быть нагружен подключением к нему соответствующего производственного механизма. Электромагнитные процессы при работе машины в режиме электродвигателя можно изучить, рассматривая каждую фазу синхронного двигателя как некоторый условный однофазный электродвигатель (рис. 16.1).

При работе синхронной машины в режиме двигателя к его зажимам подводится переменное напряжение U , под действием которого в цепи статора появляется ток статора I . В соответствии с явлением самоиндукции при этом в обмотках статора наводится противоЭДС E , ограничивающая значение этого тока. Это учтено при выборе положительных направлений напряжения U , тока I и ЭДС E на схеме рис. 16.1, для которой в соответствии со вторым законом Кирхгофа уравнение электрического равновесия синхронного электродвигателя имеет вид $\dot{U} = \dot{E} + R\dot{I} + jX\dot{I}$.

Подводимое к зажимам синхронного двигателя напряжение \dot{U} компенсируется противоЭДС \dot{E} , наводимой в обмотках якоря, и падениями напряжений в обмотке якоря $R\dot{I}$ и $jX\dot{I}$.

На рис. 16.2 построена упрощенная векторная диаграмма синхронного электродвигателя, пренебрегая влиянием незначительного активного сопротивления R обмотки якоря.

Подобно синхронному генератору, синхронный электродвигатель при изменении тока возбуждения I_v способен изменять фазу тока I , потребляемого из питающей сети.

Ранее было показано, что при работе с постоянной нагрузкой ($P = \text{const}$) при изменении тока возбуждения

I_b синхронной машины обеспечивается условие $E \sin \theta = \text{const}$ и $I \cos \varphi = \text{const}$. Поэтому при изменении тока возбуждения и $P = \text{const}$, так же как и для случая синхронного генератора, вектор \vec{E} будет перемещаться по прямой A , а вектор тока \vec{I} — по прямой B (рис. 16.2).

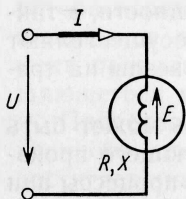


Рис. 16.1

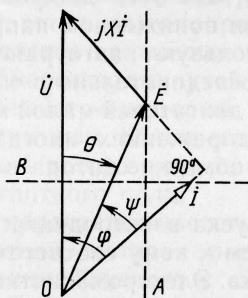


Рис. 16.2

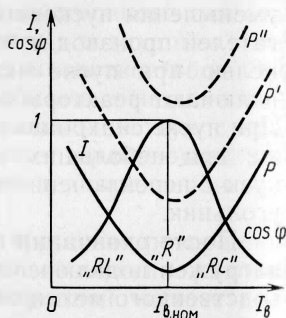


Рис. 16.3

Основываясь на упрощенной векторной диаграмме, подобно тому, как это было сделано для случая работы синхронной машины в режиме генератора, можно показать, что и в режиме двигателя зависимость изменения тока якоря $I(I_b)$ при $U = \text{const}$ и $P = \text{const}$ также представляет собой U -образную кривую (рис. 16.3).

Однако в отличие от синхронного генератора, недо возбужденный синхронный двигатель при работе в этих условиях потребляет из питающей сети отстающий по фазе от напряжения ток, в то время как перевозбужденный синхронный двигатель при работе в этих условиях потребляет опережающий ток.

Свойство синхронных электродвигателей потреблять из питающей сети опережающий ток особенно ценно для промышленных установок, так как оно позволяет одновременно с использованием синхронной машины в качестве приводного двигателя использовать ее и для повышения коэффициента мощности ($\cos \varphi$) установки без применения статических конденсаторов. При необходимости компенсации реактивных индуктивных токов питающей сети в ряде случаев мощные синхронные электродвигатели включают без нагрузки на валу, используя их только в качестве компенсаторов реактивной мощности. Для этой цели промышленность выпускает специальные синхронные электродвигатели с облегченным валом, работающие вхолостую и

предназначенные для генерирования емкостной реактивной мощности. Синхронные электродвигатели подобной конструкции называются синхронными компенсаторами или синхронными конденсаторами.

Свойства синхронных электродвигателей наглядно иллюстрируют их рабочие характеристики (рис. 16.4), к ко-

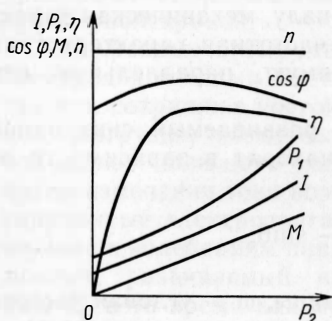


Рис. 16.4

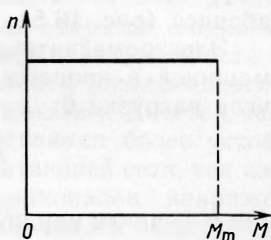


Рис. 16.5

торым относятся зависимости вращающего момента M , потребляемой из питающей сети активной мощности P_1 , коэффициента полезного действия η и коэффициента мощности $\cos \varphi$ от полезной мощности на валу P_2 двигателя при постоянном напряжении питающей сети $U = \text{const}$, постоянной частоте $f = \text{const}$ и постоянном токе возбуждения $I_b = \text{const}$. Анализ рабочих характеристик (рис. 16.4) показывает, что зависимость $M(P_2)$ является линейной, так как между моментом и полезной мощностью на валу существует прямая пропорциональность:

$$P_2 = Mn/9550,$$

где n — синхронная частота вращения электродвигателя, об/мин; P_2 — мощность на валу двигателя, кВт; M — момент, развиваемый двигателем, Н·м.

Потребляемая из питающей сети мощность P_1 растет несколько быстрее, чем полезная мощность на валу P_2 , так как с ростом нагрузки происходит возрастание тока I , потребляемого из сети, а следовательно, возрастание электрических потерь мощности в обмотках якоря, пропорциональных квадрату тока якоря.

Кривая зависимости $\eta(P_2)$ имеет вид, характерный для всех других электрических машин. С изменением нагрузки

происходит некоторое изменение коэффициента мощности $\cos\varphi$ вследствие отклонения $I(P_2)$ от прямолинейной зависимости, что подтверждается анализом общего выражения для коэффициента мощности при $U = \text{const}$: $\cos\varphi = P_1/\sqrt{3} UI$. Частота вращения синхронного электродвигателя с изменением нагрузки изменяться не будет, так как она равна синхронной частоте вращения.

Так как частота вращения синхронного электродвигателя не зависит от нагрузки на валу, механическая характеристика $n(M)$, так же как и частотная характеристика $n(I)$, представляют собой прямую, параллельную оси абсцисс (рис. 16.5).

Электромагнитный момент, развиваемый синхронной машиной в процессе работы, находят в зависимости от угла нагрузки θ :

$$M = \frac{mpUE}{\omega X} \sin\theta,$$

где p — число пар полюсов машины; ω — угловая частота вращения ротора (n — синхронная частота вращения).

Из этого уравнения видно, что при $U = \text{const}$ и $I_b = \text{const}$, а следовательно, при $E = \text{const}$ момент, развиваемый синхронной машиной, является синусоидальной функцией угла нагрузки θ . Зависимость $M(\theta)$ называется угловой характеристикой синхронной машины (рис. 16.6).

При работе в режиме генератора углу нагрузки θ условно приписывается «плюс», а в режиме двигателя — «минус». Поэтому участок угловой характеристики в правом верхнем квадранте координатной системы соответствует синхронному генератору, а участок характеристики в левом нижнем квадранте — синхронному электродвигателю.

Как видно из рис. 16.6, при возрастании нагрузки электромагнитный момент синхронной машины увеличивается только до определенного предела, равного амплитудному значению M_m , соответствующего $\theta = \pi/2$. При дальней-

шем возрастании нагрузки на валу происходит уменьшение электромагнитного момента, способного развивать двигателем в данных условиях, и нарушение равновесия между моментом нагрузки и электромагнитным моментом. Так как электро-

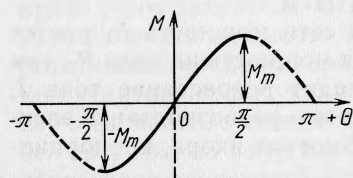


Рис. 16.6

магнитный момент оказывается меньше момента нагрузки, то двигатель выпадает из синхронизма. Происходит нарушение магнитной связи между полюсами ротора и статора, двигатель останавливается. В результате этого при углах нагрузки θ от 0 до $\pi/2$ синхронный электродвигатель, так же как и синхронный генератор, работает устойчиво, а при больших углах нагрузки неустойчиво (рис. 16.6). Неустойчивая часть характеристики показана пунктирной кривой.

Синхронные электродвигатели по сравнению с другими электродвигателями имеют существенные преимущества, так как сохраняют постоянство числа оборотов с изменением нагрузки, имеют высокий коэффициент мощности и позволяют повышать $\cos\phi$ потребителей электроэнергии путем изменения тока возбуждения машины. Вместе с тем синхронные электродвигатели оказываются более устойчивыми к колебаниям напряжения питающей сети, так как момент, развиваемый ими, пропорционален напряжению U , в то время как момент асинхронного электродвигателя пропорционален квадрату напряжения U^2 питающей сети.

К недостаткам синхронных электродвигателей следует отнести то, что они характеризуются относительно сложным процессом пуска, способны выпадать из синхронизма при перегрузках, затрудняют возможность регулирования частоты вращения исполнительного механизма и связаны с необходимостью применения постоянного и переменного токов одновременно.

Отмеченные особенности синхронных электродвигателей являются причиной того, что они наиболее широко применяются для привода механизмов с редкими пусками, когда необходимо или допустимо иметь постоянную частоту вращения.

Задание по работе

1. Ознакомиться с конструкцией трехфазного синхронного электродвигателя на демонстрационном стенде и с лабораторной установкой для испытания синхронного двигателя.

2. Произвести пуск синхронного электродвигателя с помощью вспомогательного электродвигателя постоянного тока.

3. Снять U -образную характеристику синхронного электродвигателя.

4. Снять рабочие характеристики синхронного электродвигателя.

5. Составить краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Исследовать работу синхронной машины в режиме электродвигателя. Для этого собрать на панели стенда «Синхронная машина» электрические цепи установки для снятия основных характеристик синхронного генератора, работающего на питающую сеть большой мощности (см. рис. 15.11). В качестве приводного двигателя использовать электродвигатель постоянного тока параллельного возбуждения, электрическая цепь которого собирается на той же панели, что и цепь исследуемой синхронной машины. Монтаж установки выполнить в соответствии с монтажной схемой, приведенной на рис. 15.12.

2. Включить источник питания приводного электродвигателя постоянного тока и установить значение напряжения питания равным 220 В. Осуществить пуск двигателя постоянного тока и установить частоту вращения его якоря $n = 3000$ об/мин. Изменение частоты вращения приводного электродвигателя осуществлять изменением тока его возбуждения (изменением сопротивления регулировочного реостата в цепи тока возбуждения двигателя).

3. Подключить обмотку ротора синхронной машины к регулируемому источнику постоянного напряжения. Для этого необходимо нажать кнопку «Вкл» позиции «Возбуждение синхронной машины» и по амперметру установить ток возбуждения синхронной машины равным номинальному значению $I_b = I_{b\text{ном}}$. Регулировка тока возбуждения синхронной машины производится регулировочным устройством на панели «Синхронная машина». Затем нажать кнопку «Вкл» позиции «Включение статора синхронной машины» и кнопку «Вкл» позиции «Включение к сети синхронной и асинхронной машин». После того как ротор синхронной машины начнет вращаться с синхронной частотой вращения, кнопкой «Выкл» на панели «Машины постоянного тока» отключить от источника питания вспомогательный двигатель постоянного тока.

4. Исследовать работу синхронной машины в режиме электродвигателя, нагрузив машину до заданного значения мощности, потребляемой из сети, путем изменения

нагрузки на валу с помощью электромагнитного тормоза агрегата № 2, включив напряжение питания цепи обмотки возбуждения тормоза, установить момент на валу синхронного электродвигателя $M_2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м}$ ($1 \text{ кГм} = 9,81 \text{ Н} \cdot \text{м}$).

5. Снять U -образную характеристику синхронного электродвигателя $I(I_b)$, т. е. зависимость тока I , потребляемого двигателем из питающей сети, от тока возбуждения I_b при постоянном моменте на валу ($M_2 = 1 \text{ Н} \cdot \text{м} = \text{const}$) и постоянном напряжении питающей сети $U = \text{const}$.

Изменение тока возбуждения синхронного электродвигателя производить в диапазоне 0,5—6 А с интервалом через 1 А. При проведении опыта необходимо строго поддерживать постоянным значение момента нагрузки на валу синхронного двигателя. Результаты измерений записать в табл. 16.1.

Т а б л и ц а 16.1

Номера измерений	Измерения						Вычисления
	U , В	I , А	I_b , А	P_1 , Вт	n , об/мин	M_2 , Н·м	$\cos\varphi$
1							
2							
...							

6. После окончания опыта разгрузить электродвигатель путем уменьшения момента нагрузки на валу до нуля, не отключая двигатель от питающей сети.

7. Снять рабочие характеристики синхронного электродвигателя $I(P_2)$, $\cos\varphi(P_2)$, $\eta(P_2)$, $M_2(P_2)$, $P_1(P_2)$, т. е. зависимость тока I , коэффициента мощности $\cos\varphi$, КПД η , вращающего момента M и потребляемой мощности P_1 от полезной мощности P_2 на валу двигателя при постоянном токе возбуждения $I_b = \text{const}$ и постоянном напряжении $U = \text{const}$:

а) установить ток возбуждения синхронного электродвигателя равным $I_b = 2 \text{ А}$ при $P_2 = 0$, т. е. при холостом ходе. Записать показания приборов в табл. 16.2;

б) постепенно изменяя момент нагрузки на валу синхронного электродвигателя от значения, равного нулю, до значения, при котором ток, потребляемый синхронным

Т а б л и ц а 16.2

Номера измере- ний	Измерения							Вычисления			
	U , В	I , А	P_1 , Вт	M_2 , Н·м	n , об/ мин	U_B , В	I_B , А	P_B , Вт	P_2 , Вт	η	$\cos\varphi$
1											
2											
...											

двигателем, будет номинальным. Для каждого момента нагрузки записать показания приборов в табл. 16.2 (произвести 6—7 измерений);

в) разгрузить синхронный электродвигатель и остановить его, выключив напряжение питающей сети и напряжение питания цепи возбуждения.

8. Обработка результатов опытов:

а) построить U -образную характеристику синхронного электродвигателя $I(I_B)$ и $\cos\varphi(I_B)$ при $P_2 = \text{const}$, используя измерения и вычисления, приведенные в табл. 16.1;

б) построить рабочие характеристики синхронного двигателя $n(P_2)$; $\cos\varphi(P_2)$; $\eta(P_2)$; $I(P_2)$ и $M_2(P_2)$ в одной координатной системе.

Мощность на валу синхронного электродвигателя (полезная мощность): $P_2 = 0,105M_2n$, Вт.

Коэффициент полезного действия электродвигателя:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1 + U_B I_B},$$

где $P_B = U_B I_B$ — мощность цепи возбуждения, подведенная к ротору синхронного двигателя, в опыте определяется по формуле $P_B = I_B^2 R_B$ ($R_B = 5,5$ Ом).

Коэффициент мощности двигателя

$$\cos\varphi = P_1 / \sqrt{3} UI,$$

здесь P_1 — активная мощность, подведенная к статору синхронного электродвигателя.

Контрольные вопросы

1. Объясните устройство и принцип действия трехфазного синхронного электродвигателя.

2. Перечислите способы пуска трехфазного синхронного электродвигателя.

3. Почему с возрастанием нагрузки на валу синхронного электродвигателя частота вращения его ротора не изменяется?

4. Как осуществляется переход от генераторного режима работы синхронной машины к двигательному?

5. Укажите условия, при которых синхронный электродвигатель работает в режиме синхронного компенсатора.

6. Поясните влияние тока возбуждения на режим работы синхронного электродвигателя.

7. При каких условиях происходит выпадение синхронного электродвигателя из синхронизма, в чем оно проявляется?

8. Объясните, можно ли изменить коэффициент мощности синхронного электродвигателя, работающего при неизменной нагрузке.

9. Как осуществить изменение направления вращения ротора синхронного электродвигателя?

10. Как происходит изменение тока статора при изменении момента нагрузки на валу синхронного электродвигателя.

Лабораторная работа 17

Однофазные бесконтактные сельсины

Цель работы. Ознакомление с конструкцией и основными характеристиками однофазных бесконтактных сельсинов при работе в индикаторном и трансформаторном режимах.

Основные теоретические положения

В процессе реализации дистанционной и синхронной передач вращательных или угловых перемещений двух или нескольких осей различных машин, приборов и аппаратов, механически не связанных между собой, широко применяются индукционные однофазные системы синхронной связи, состоящие из двух или нескольких однотипных специальных электрических микромашин переменного тока — сельсинов, электрически связанных между собой.

Индукционные системы синхронной связи, так же как и используемые в них сельсины-датчики и сельсины-приемники, выполняются трех- или однофазными. Трехфазные системы и используемые в них трехфазные сельсины обычно применяются при относительно больших мощностях в системах «электрического вала». В системах малой мощности при выполнении индукционной системы синхронной связи применяются *однофазные* сельсины, выполняемые по типу асинхронной машины с однофазной первичной обмоткой возбуждения и трехфазной вторичной обмоткой синхронизации. При этом однофазная обмотка

возбуждения может быть расположена как на статоре, так и на роторе сельсина, а трехфазная обмотка синхронизации — на роторе или статоре.

В конструктивном отношении сельсины выполняют контактными и бесконтактными. *Контактные* имеют на статоре явнополюсную или распределенную обмотку возбуждения, а на роторе — распределенную обмотку синхронизации. Для возможности присоединения роторной обмотки к линии связи концы ее выводятся на контактные кольца, соединенные с соответствующими выводами на корпусе сельсина с помощью скользящих щеток. Щеточно-контактный узел является самым ненадежным местом контактного сельсина, поэтому широко применяются бесконтактные сельсины, лишенные этих недостатков.

Устройство *бесконтактного* сельсина показано на схеме рис. 17.1, где обмотки синхронизации 1 и возбуждения 2

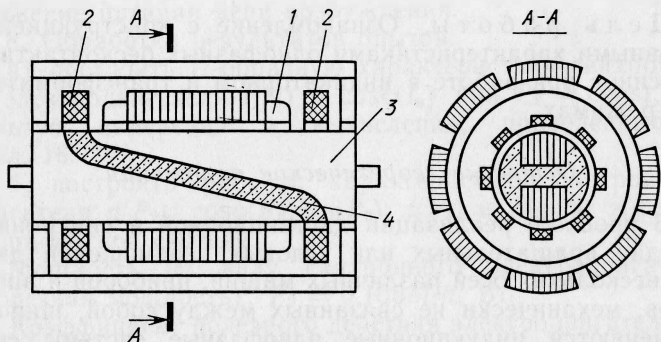


Рис. 17.1.

расположены на статоре сельсина и выполнены неподвижными. Магнитная связь обмоток возбуждения и синхронизации осуществляется через магнитопровод подвижного ротора 3, полюса которого разделены немагнитной прокладкой 4. Благодаря такой конструкции ротора положение оси потока возбуждения относительно обмоток синхронизации при повороте ротора изменяется так же, как и в контактных сельсинах, так как принцип действия обоих типов сельсинов один и тот же. Несмотря на большую сложность конструкции бесконтактных сельсинов, отсутствие в них скользящих контактов позволяет значительно увеличить надежность работы и стабильность их характеристик.

Система индуктивной синхронной связи может работать в двух режимах: индикаторном и трансформаторном. В *индикаторном*, когда целью синхронной связи является передача угловых перемещений ротора сельсина-датчика *СД* при незначительном моменте сопротивления ротора сельсина-приемника *СП*, сельсины соединены по схеме рис. 17.2. Обмотки возбуждения подключены к одно-

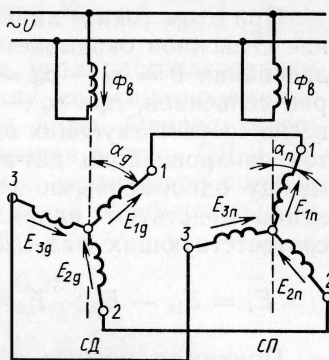


Рис. 17.2

фазной цепи переменного тока, а одноименные выводы обмоток синхронизации (1, 2 и 3) линией связи соединены между собой. Однофазные переменные потоки, создаваемые обмотками возбуждения датчика и приемника, индуцируют в одноименных фазах обмоток синхронизации ЭДС, действующие значения которых зависят от пространственного расположения осей фаз относительно оси соответствующего потока возбуждения:

$$\begin{aligned} E_{1д} &= E_{мд} \cos \alpha_d; & E_{1п} &= E_{мп} \cos \alpha_n; \\ E_{2д} &= E_{мд} \cos(\alpha_d - 120^\circ); & E_{2п} &= E_{мп} \cos(\alpha_n - 120^\circ); \\ E_{3д} &= E_{мд} \cos(\alpha_d + 120^\circ); & E_{3п} &= E_{мп} \cos(\alpha_n + 120^\circ), \end{aligned}$$

где $E_{1д}$, $E_{2д}$, $E_{3д}$ — действующие значения ЭДС индуцируемых потоков возбуждения в соответствующих фазах синхронизации сельсина-датчика; $E_{мд}$ — амплитудное значение ЭДС фазы обмотки синхронизации при совпадении ее оси с осью потока возбуждения ($\alpha_d = 0$); α_d — угол между осями обмотки возбуждения и осью первой фазы обмотки синхронизации сельсина-датчика (угол поворота ротора). Аналогичные значения с индексом «п» относятся к сельсину-приемнику.

При одинаковом расположении осей одноименных фаз обмоток синхронизации датчика и приемника относительно соответствующих осей обмоток возбуждения, т. е. когда $\alpha_d = \alpha_n$ в фазах обмоток синхронизации сельсина-датчика и сельсина-приемника индуцируются одинаковые ЭДС, уравнивающие друг друга: $E_{1д} = E_{1п}$; $E_{2д} = E_{2п}$ и $E_{3д} = E_{3п}$.

При этом токи в линиях связи отсутствуют и положение сельсинов оказывается согласованным (угол рассогласования $\theta = \alpha_d - \alpha_n = 0$). При рассогласовании роторов сельсинов, при $\alpha_d - \alpha_n < 0$ или $\alpha_d - \alpha_n > 0$, равновесие соответствующих одноименных ЭДС в фазах обмоток синхронизации датчика и приемника нарушается и между одноименными зажимами их обмоток синхронизации действуют напряжения, равные разности ЭДС, соответствующих фаз *СД* и *СП*:

$$E_1 = E_{1d} - E_{1n}; \quad E_2 = E_{2d} - E_{2n}; \quad E_3 = E_{3d} - E_{3n}.$$

Принимая полные сопротивления фаз обмоток синхронизации сельсина-датчика и сельсина-приемника с учетом сопротивлений линий связи одинаковыми ($Z_d = Z_n = Z$), можно найти уравнивающие токи в линиях связи и фазах: $I_1 = E_1 / 2Z$; $I_2 = E_2 / 2Z$; $I_3 = E_3 / 2Z$. Эти токи, взаимодействуя с магнитными потоками обмоток возбуждения *СД* и *СП*, в каждом сельсине создают вращающий (синхронизирующий) момент M_c , под действием которых система стремится вернуться в согласованный режим. Если положение ротора *СД* зафиксировано под углом α_d , то под действием синхронизирующего момента M_c ротор приемника *СП* повернется на угол $\alpha_n = \alpha_d$, при котором в системе восстановится согласованное состояние. Таким же образом осуществляется дистанционная синхронная передача угла в индикаторном режиме. Значение синхронизирующего момента при этом зависит от угла рассогласования θ : $M_c = M_{\max} \sin \theta$, где M_{\max} — наибольший (максимальный) синхронизирующий момент при угле рассогласования $\theta = 90^\circ$ и постоянном угле сдвига ψ между током и ЭДС цепи.

В реальных условиях вследствие наличия реакции ротора и непостоянства активных и индуктивных сопротивлений фаз обмотки синхронизации сельсинов зависимость $M_c(\theta)$ несколько отличается от синусоидальной. При этом максимум смещен либо влево, либо вправо от углов 90 и 270° .

Для системы синхронной связи с точки зрения точности основное значение имеет не максимальное значение синхронизирующего момента, а крутизна его нарастания при малых углах рассогласования. В качестве показателя крутизны нарастания синхронизирующего момента принимают удельный синхронизирующий момент, развиваемый на валу *СП* при угле рассогласования $\theta = 1^\circ$,

который определяют из выражения $M'_{cy} = \left(\frac{dM_c}{d\theta} \right)_{\theta=0^\circ}$.

При работе сельсинной пары угол рассогласования при отсутствии нагрузки на валу сельсина-приемника теоретически должен быть равен нулю. Однако вследствие наличия трения и других причин роторы *СД* и *СП* всегда сдвинуты на некоторый угол статической ошибки $\Delta\theta_c$. В зависимости от угла статической ошибки сельсины делятся на три класса точности:

- I — датчик: $\Delta\theta_c$ от 0 до $\pm 0,25^\circ$,
приемник: $\Delta\theta_c$ от 0 до $\pm 0,75^\circ$;
- II — датчик: $\Delta\theta_c$ от $\pm 0,25$ до $\pm 0,5^\circ$,
приемник: $\Delta\theta_c$ от $\pm 0,75$ до $\pm 1,5^\circ$;
- III — датчик: $\Delta\theta_c$ от $\pm 0,5$ до $\pm 1,0^\circ$,
приемник: $\Delta\theta_c$ от $\pm 1,5$ до $\pm 2,5^\circ$.

При работе системы индукционной синхронной связи в *трансформаторном* режиме соединение сельсина-датчика и сельсина-приемника выполняют по схеме рис. 17.3. Обмотка возбуждения сельсина-приемника не присоединяется к питающей сети возбуждения и является выходной, в которой индуцируется ЭДС, создаваемая суммар-

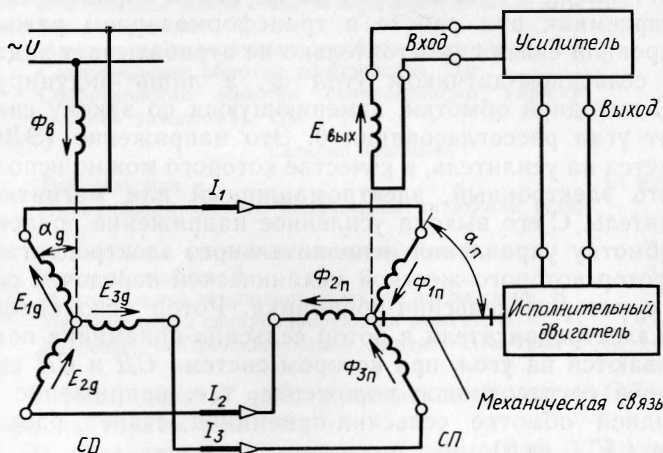


Рис. 17.3

ной магнитодвижущей силой фаз обмотки синхронизации сельсина-приемника. Магнитодвижущая сила каждой фазы обмотки синхронизации сельсина-приемника соз-

дается токами, обусловленными действием ЭДС в фазах обмотки синхронизации сельсина-датчика. Результирующий магнитный поток сельсина-приемника будет пульсирующим и направленным в общем случае под углом $\theta = \alpha_d - \alpha_n$ к оси выходной обмотки сельсина-приемника. ЭДС, наводимая этим потоком в выходной обмотке сельсина-приемника, может быть найдена из выражения

$$E_{\text{вых}} = E_m \cos \theta,$$

где E_m — амплитудное (максимальное) значение выходной ЭДС при угле рассогласования $\theta = \alpha_d - \alpha_n = 0$.

Для практического использования трансформаторного режима рассматриваемой системы синхронной связи удобно, чтобы зависимость $E_{\text{вых}}(\theta)$ была синусоидальной, т. е. чтобы при согласовании, когда $\theta = 0$, $E_{\text{вых}} = 0$. Это достигается тем, что ротор сельсина-приемника смещают на постоянный угол, равный 90° , и это положение принимают за начальное. Вследствие этого за начало отсчета угла сельсина-приемника α_n принимается ось, перпендикулярная оси однофазной выходной обмотки.

В этом случае при нулевом угле рассогласования $\theta = 0$ выходная ЭДС $E_{\text{вых}} = 0$, а зависимость $E_{\text{вых}}(\sin \theta)$ представлена в виде $E_{\text{вых}} = E_m \sin \theta$. Таким образом, сельсин-приемник при работе в трансформаторном режиме синхронной связи самостоятельно не обрабатывает заданный сельсином-датчиком угол α_d , а лишь индуцирует ЭДС выходной обмотки, изменяющуюся по закону синуса от угла рассогласования θ . Это напряжение (ЭДС) подается на усилитель, в качестве которого можно использовать электронный, электромашинный или магнитный усилитель. С его выхода усиленное напряжение подается на обмотку управления исполнительного электродвигателя, ротор которого жесткой механической передачей связан с ротором сельсина-приемника. Ротор исполнительного электродвигателя и ротор сельсина-приемника поворачиваются на угол, при котором система СД и СП приходит в согласованное положение, т. е. напряжение на выходной обмотке сельсина-приемника станет равным нулю ($E_{\text{вых}} = 0$).

Задание по работе

1. Ознакомиться с конструкцией однофазного бесконтактного сельсина, приборами и лабораторной установкой для испытаний системы синхронной связи в индикаторном и трансформаторном режимах.

2. Исследовать работу сельсинной пары в индикаторном режиме и снять зависимость синхронизирующего момента сельсина от угла рассогласования.

3. Исследовать работу сельсинной пары в трансформаторном режиме и снять зависимость выходного напряжения сельсина-приемника от угла рассогласования.

4. Определить класс точности исследуемой сельсинной пары.

5. Сделать краткие выводы по работе.

Методические указания по выполнению работы

1. Ознакомиться с принципом действия и конструкцией бесконтактного сельсина на демонстрационном стенде, измерительными приборами и прочим оборудованием экспериментальной установки и записать в отчет по лабораторной работе технические данные используемых сельсинов.

Сельсин-датчик

Тип сельсина	БД404А
Номинальная частота напряжения питающей сети, Гц	50
Номинальное напряжение возбуждения, В	110
Ток возбуждения, А	0,45
Максимальное вторичное линейное напряжение, В	49
Сопротивление обмотки возбуждения, Ом	46
Сопротивление обмотки синхронизации (между двумя зажимами), Ом	73

Сельсин-приемник

Тип сельсина	БС404А
Номинальная частота напряжения питающей сети, Гц	50
Номинальное напряжение возбуждения, В	110
Ток возбуждения, А	0,45
Максимальное вторичное линейное напряжение, В	49
Максимальный синхронизирующий момент, Н·м	0,235
Удельный синхронизирующий момент, Н·м/град	$4,1 \cdot 10^{-3}$

2. Исследовать работу сельсинной пары *СД — СП* в индикаторном режиме:

а) согласно принципиальной схеме рис. 17.4 собрать электрическую цепь рис. 17.5;

б) установить груз на планке сельсина-приемника в нулевое положение, а напряжение на обмотках возбуждения сельсинов равным номинальному $U_{\text{ном}} = 110$ В; напряжение на обмотки возбуждения сельсинов подается от регулируемого источника переменного напряжения;

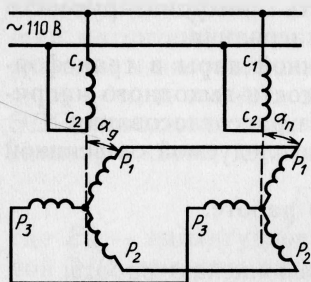


Рис. 17.4

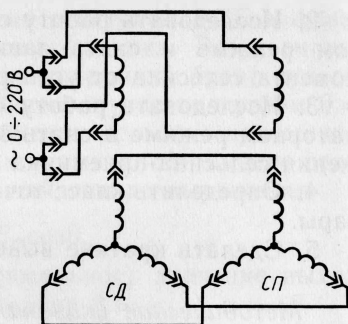


Рис. 17.5

в) ротор сельсина-датчика установить по лимбу в положение 0 и зафиксировать стопорным устройством;

г) отсчитать по лимбу сельсина-приемника угол обработки α'_n , принять его за нулевое значение $\alpha'_n = \alpha_{n0}$ и записать в табл. 17.1;

Т а б л и ц а 17.1

α_d	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°	210°	240°	270°	300°	330°	360°
α'_n													
Угол обработки СП α_n													
Угол статической ошибки $\Delta\theta = \alpha_d - \alpha_n$													

д) изменяя угол поворота сельсина-датчика α_d , регистрировать угол отработки сельсина-приемника $\alpha_n = \alpha'_n - \alpha_{n0}$, α_n — угол отработки ротора сельсина-приемника; α'_n — значение угла поворота ротора сельсина-приемника от нуля лимба. Результаты измерений записать в табл. 17.1.

При исследовании работы сельсинной пары в индикаторном режиме испытания необходимо проводить быстро,

во избежание недопустимого перегрева обмоток сельсина.

3. Снять зависимость синхронизирующего момента от угла рассогласования $M_c(\theta)$ при работе сельсинной пары в индикаторном режиме:

а) установить подвижный груз на лимбе сельсина-приемника в нулевое положение, а планку, по которой он перемещается, в строго горизонтальное положение (нулевое положение ротора по лимбу) и зафиксировать стопором;

б) записать начальное угловое положение по лимбу $\alpha_{д0}$ ротора сельсина-датчика и зафиксировать его стопорным устройством. Это положение ротора сельсина-датчика принимается за исходный нуль; отсчет угла поворота ротора сельсина-датчика производят, исходя из выражения $\alpha_d = \alpha'_d - \alpha_{д0}$, где α_d — угол поворота ротора сельсина-датчика от исходного положения; α'_d — значение угла поворота ротора сельсина-датчика от нуля лимба;

в) задать момент на валу сельсина-приемника смещением по штанге подвижного груза на один, два деления от нулевого положения;

г) ротор сельсина-датчика, предварительно расстопорив оба сельсина, повернуть на угол, при котором ротор сельсина-приемника повернется в прежнее положение (нулевое положение по лимбу), произвести отсчет угла поворота ротора сельсина-датчика, результат записать в табл. 17.2.

Т а б л и ц а 17.2

Плечо груза l , м						
Синхронизирующий момент M_c , Н·м						
Угол рассогласования $\theta = \alpha_d$, град						

Угол рассогласования θ в этом случае определяется как равный углу поворота ротора сельсина-датчика, так как угол поворота ротора сельсина-приемника остается в новом установившемся режиме работы системы неизменным $\alpha_n = 0$, при этом $\theta = \alpha_d - \alpha_n = \alpha_d$;

д) далее, по указанной методике, снять пять-шесть точек зависимости $M_c(\theta)$ в диапазоне изменения угла поворота сельсина-датчика $0-60^\circ$.

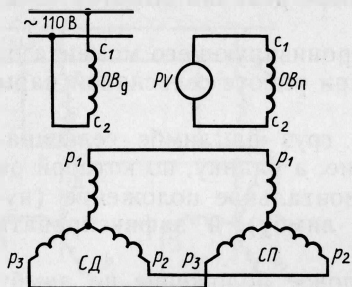


Рис. 17.6

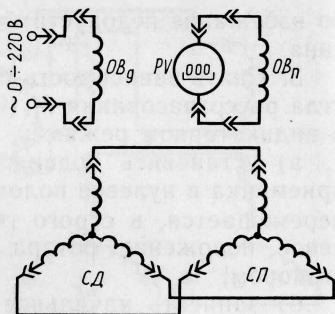


Рис. 17.7

4. Исследовать работу сельсинной пары *СД* — *СП* в трансформаторном режиме и снять зависимость действующего значения выходного напряжения на зажимах обмотки возбуждения сельсина-приемника от угла рассогласования $U_n(\theta)$:

а) по принципиальной схеме рис. 17.6 собрать электрическую цепь рис. 17.7 на лабораторном стенде;

б) установить начало отсчета углов рассогласования, с этой целью ротор сельсина-датчика закрепить в нулевом положении по лимбу, а ротор сельсина-приемника зафиксировать стопором в положении, при котором выходное напряжение (напряжение на зажимах обмотки возбуждения) отсутствует или будет минимальным;

в) расстопорив ротор сельсина-датчика, повернуть его на заданный угол рассогласования от 0 до 180° , произвести соответственно измерение выходного напряжения сельсина-приемника; результат измерений записать в табл. 17.3.

Т а б л и ц а 17.3

Угол рассогласования $\theta = \alpha_d$, град	0	15	30	45	60	75	90	105	120	135	150	165	180
Выходное напряжение U_n , В													

5. Обработка результатов измерений:

а) по результатам измерений табл. 17.1 определить класс точности сельсинной пары; при определении угла статистической ошибки экспериментально последняя принимается равной среднеарифметическому значению мак-

симальной положительной и максимальной отрицательной погрешностей, т. е. $\Delta\theta_{\text{ср}} = [(+\Delta\theta) + (-\Delta\theta)]/2$;

б) по результатам измерений табл. 17.2 построить зависимость синхронизирующего момента от угла рассогласования $M_{\text{с}}(\theta)$. Угол рассогласования $\theta = \alpha_{\text{д}} - \alpha_{\text{п}} = \alpha_{\text{д}}$, так как угол поворота ротора сельсина-приемника остается неизменным и равным нулю по принятой методике исследования. Синхронизирующий момент $M_{\text{с}}$ рассчитывают как произведение массы груза на текущее значение плеча груза l , т. е. $M_{\text{с}} = ml$;

в) по результатам п. 4 построить зависимость действующего значения выходного напряжения сельсина-приемника от угла рассогласования сельсинной пары, т. е. $U_{\text{п}}(\theta)$; угол рассогласования рассчитывают по значению угла поворота ротора сельсина-датчика $\theta = \alpha_{\text{д}}$.

Контрольные вопросы

1. Поясните назначение систем синхронной связи и дайте их классификацию.

2. Объясните принцип действия и устройство контактного и бесконтактного сельсинов.

3. В каких случаях применяется система синхронной связи в индикаторном режиме?

4. Объясните принцип работы системы синхронной связи с использованием однофазных сельсинов в индикаторном режиме.

5. В каких случаях используется система синхронной связи в трансформаторном режиме?

6. Нарисуйте схему и объясните работу системы синхронной сельсинной связи в трансформаторном режиме.

7. Объясните различие между системами токов и ЭДС трехфазной обмотки синхронизации сельсина и трехфазными системами токов и напряжений промышленной частоты.

8. Какие факторы влияют на синхронизирующий момент сельсина?

9. Как зависит выходное напряжение сельсина-приемника от угла рассогласования?

10. Укажите преимущества и недостатки систем синхронной связи в индикаторном и трансформаторном режимах.

ПРИЛОЖЕНИЯ

В приложениях приведены краткие характеристики и некоторые особенности электроизмерительных приборов, входящих в комплект универсального лабораторного стенда ЭВ-4 по электротехнике

Приложение П. 1. Комплект измерительный К505

Измерительный комплект К505 предназначен для измерения переменных (синусоидальных) токов, напряжений и активных мощностей в одно- и трехфазных трех- и четырехпроводных электрических цепях при равномерной и неравномерной нагрузках фаз.

Включение комплекта в одно- или трехфазную электрическую цепь для измерения токов, напряжений и активной мощности производится согласно схемам, приведенным на внутренней стороне крышки прибора (комплекта). При этом источник питания (генератор или сеть) подключается к группе зажимов «Генератор», а нагрузка — к группе зажимов «Нагрузка» в соответствии с указанной маркировкой фаз.

Измерение токов до 10 А на пределах 0,5; 1; 2,5; 5 и 10 А производится амперметром электромагнитной системы класса точности 0,5, подключенным к вторичной обмотке встроенного в комплект трансформатора тока с номинальным значением, равным 5 А.

Для расширения пределов измерения тока предусмотрен отдельный (выносной) трансформатор, позволяющий производить измерение до 600 А. В трехфазных электрических цепях при измерении токов до 10 А амперметр переключателем фаз ВЗ переключается из одной фазы трехфазной системы в другую без разрыва токовой цепи.

Измерение напряжений в однофазных или четырехпроводных трехфазных цепях на пределах 30; 75; 150; 300; 450 и 600 В производится вольтметром электромагнитной системы класса точности 0,5, включаемым между зажимом одной из фаз А, В или С и зажимом N нейтрального провода.

При измерениях напряжений в трехпроводных трехфазных электрических цепях вольтметр включается между зажимами соответствующей фазы и искусственной нейтральной точки N*.

Измерение активной мощности в одно- и трехфазной электрических цепях производится ферродинамическим ваттметром класса точности 0,5. Последовательная (токовая) цепь ваттметра, так же как и амперметр, подключена к вторичной обмотке встроенного трансформатора тока и может переключаться из одной фазы в другую без разрыва токовой цепи, а параллельная цепь ваттметра включается между зажимом соответствующей фазы и зажимом нейтрального провода (или

* При неравномерной нагрузке и соединении потребителя по схеме «звезда» показания вольтметра не соответствуют действительным значениям фазных напряжений.

искусственной нейтральной точки). Поэтому при измерениях активной мощности в трехфазных четырехпроводных электрических цепях с равномерной и неравномерной, а в трехпроводных трехфазных цепях с равномерной нагрузкой ваттметр показывает фазную мощность соответствующей фазы трехфазной системы.

При неравномерной нагрузке трехпроводной цепи ваттметр не показывает фазной мощности соответствующей фазы, однако сумма трех показаний ваттметра при этом равна суммарной активной мощности трехфазной цепи: $P = P_A + P_B + P_C$, где P_A , P_B и P_C — показания ваттметра при наличии переключателя фаз ВЗ в положении А, В и С.

Основная погрешность приборов комплекта К505 в диапазоне частот 40—65 Гц при измерении токов до 10 А, напряжения от 75 до 600 В и мощностей, соответствующих указанным значениям токов и напряжений, не превышает $\pm 0,5\%$ от конечного значения рабочей части шкалы приборов.

На лицевой панели комплекта К505 приведены таблицы цен делений шкал амперметра, вольтметра и ваттметра в соответствии с их номинальными значениями с учетом коэффициента трансформации выносного измерительного трансформатора тока УТТ-5М.

Комплект имеет встроенный фазоуказатель — прибор для проверки чередования фаз. Последовательность включения фаз определяется по направлению вращения диска фазоуказателя, на котором нанесена стрелка направления вращения при прямом чередовании фаз. Для обеспечения техники безопасности при работе с комплектом К505 зажим заземления соединяется с заземляющим зажимом лабораторного стенда.

Приложение П. 2. Вольтметр универсальный цифровой В7-22А

Универсальный электронный вольтметр В7-22А предназначен для измерения постоянных и переменных (синусоидальных) напряжений и токов, а также сопротивлений постоянному току с представлением результатов измерений в цифровой форме.

Прибор позволяет производить измерения:

- а) напряжения постоянного тока от 0,0001 до 1000* В с пределами измерений 0,2; 2; 20; 200 и 1000 В;
- б) постоянного тока от 0,0001 до 2000 мА с пределами измерений 0,2; 2; 20; 200 и 2000 мА;
- в) напряжения переменного тока от 0,0001 до 2 В на частотах 0,045—20 кГц, от 0,0001 до 300 В на частотах 0,045—10 кГц;
- г) переменного тока от 0,0001 до 2000 мА на частотах 0,045—10 кГц;

- д) сопротивлений постоянному току от 0,0001 до 2000 кОм.

Входное сопротивление прибора при измерении напряжения постоянного тока не менее 100 МОм на пределах 0,1 и 2 В, $10 \pm 0,1$ МОм на остальных пределах измерения; при измерении напряжения переменного тока не менее 10 МОм на пределах 0,2 и 2 В; $10 \pm 0,1$ МОм на остальных пределах измерения. Входная емкость прибора не превышает 120 пФ. Основная погрешность измерений в указанной области частот не превышает $\pm 0,6\%$.

Прибор имеет три входа: для измерения напряжений постоянного и переменного токов более 2 В; для измерения постоянного и переменного напряжений до 2 В и вход (I , R) для измерения тока и сопротивления.

* На переключателе пределов измерений нажимается кнопка 2000.

Выбор пределов и рода измерений, а также установки нуля — ручные, определение и индикация полярности и перегрузки — автоматические.

Прибор имеет технологический выход на центральный пульт управления. Управление (ручка, кнопка и т. д.) выведено на переднюю панель прибора (рис. П. 1).

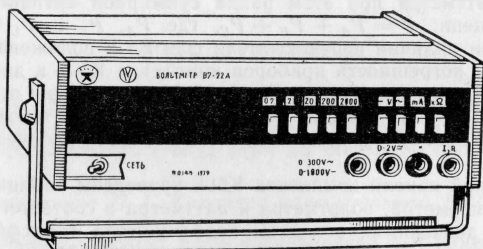


Рис. П.1

Действие прибора основано на преобразовании измеряемого напряжения, тока или сопротивления в пропорциональный им интервал времени, который преобразуется в дискретную форму и в цифровой код.

Структурная схема прибора приведена на рис. П. 2.

Измеряемые значения (U_{\sim} , U_{-} , R , I_{-} , I_{\sim}) с помощью делителя напряжения 1 (при $U_{вх} > 2$ В) и соответствующих преобразователей (2, 3, 4) трансформируются в нормированное постоянное аналоговое напряжение, передаваемое в аналого-цифровой преобразователь (5), осуществляющий основную функцию преобразования нормированного аналогового напряжения в цифровой код. При этом преобразование нормированного напряжения во временной интервал осуществляется методом двухтактного интегрирования, сущность которого состоит в том, что в течение фиксированного интервала времени t_1 , значение которого зависит от времени генерации в приборе 1000 стандартных импульсов, происходит интегрирование (первый такт интегрирования) входного напряжения, заключающееся в разряде интегрирующей емкости, предварительно заряженной до определенного напряжения током,

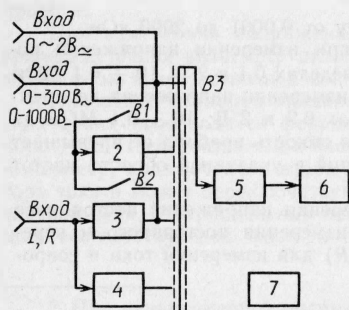


Рис. П.2

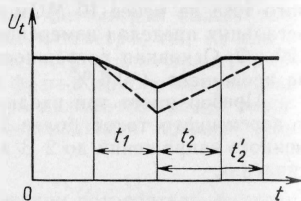


Рис. П.3

пропорциональным входному напряжению (рис. П. 3). Второй такт интегрирования заключается в зарядке указанной емкости эталонным током. При этом скорость заряда постоянна и интервал времени t_2 , в течение которого емкость заряжается до первоначального значения напряжения, пропорционален его входному значению. Интервал времени заполняется счетными импульсами. Индикаторным устройством 6 (см. рис. П. 2) производится подекадный пересчет этих импульсов с последующей индикацией результата в десятичном коде на цифровом отсчетном устройстве. Питание всех блоков прибора осуществляется от встроенного в прибор стабилизированного источника напряжения (позиция 7, рис. П. 2).

Цифровой вольтметр характеризуется высокой точностью измерения, быстроедействием, объективным отсчетом результата измерений в цифровой форме и возможностью вывода результата измерения на цифропечатающее устройство и ввода в вычислительные машины.

Приложение П. 3. Генератор сигналов ГЗ-102

Низкочастотный генератор сигналов ГЗ-102 представляет собой источник синусоидальных электрических колебаний звуковой и ультразвуковой частот с малым коэффициентом гармоник. Генератор может быть использован для регулировки, проверки и испытания электронной аппаратуры в лабораторных и производственных условиях.

Основные технические характеристики генератора.

1. Диапазон частот генератора заключен в пределах от 20 до 200 000 Гц, который перекрывается четырьмя поддиапазонами; в их пределах частота может регулироваться плавно от 20 до 200; от 200 до 2000; от 2000 до 20 000; от 20 000 до 200 000 Гц.

2. Номинальная выходная мощность на активной нагрузке $600 \pm \pm 6$ Ом на частоте 1000 Гц составляет не менее 100 мВт (7,75 В). Максимальное выходное напряжение не менее 8 В.

3. Основная погрешность прибора по частоте не превышает $\pm \left(1 + \frac{50}{f} \right) \%$ в диапазоне частот от 20 до 20 000 Гц и 1,5 % в диапазоне частот от 20 до 200 кГц.

Электрическая структурная схема генератора ГЗ-102 приведена на рис. П. 4. Генератор, являющийся переносным прибором, состоит из задающего автогенератора 1 типа RC, выходного четырехкаскадного полупроводникового усилителя 2, индикатора выходного напряжения 5, аттенюатора 3 и стабилизированного источника питания 4.

Генерируемые задающим генератором синусоидальные электрические колебания заданной частоты и амплитуды поступают на выходной усилитель, усиливающий напряжение и мощность этих колебаний и одновременно согласующий выход задающего генератора с нагрузкой. На выходе усилителя напряжение контролируется индикатором напряжения, который представляет собой измерительную мостовую схему. Значение выходного напряжения можно изменять плавно с помощью потенциометра, включенного на выходе задающего генератора, и ступенчато, через 10 дБ (до 60 дБ), с помощью делителя напряжения (аттенюатора). Питание блоков генератора осуществляется от стабилизированного источника, рассчитанного на ток 0,1—0,13 А. Источ-

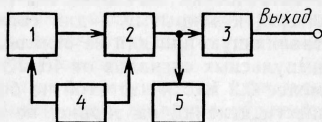


Рис. П. 4

ник состоит из одноконтурного двухполупериодного выпрямителя на полупроводниковых диодах и компенсационного стабилизатора напряжения. На передней панели генератора расположены органы управления. В левой части панели находятся шкала и ручка плавной установки частоты в пределах каждого поддиапазона, переключатель поддиапазонов частоты «Множитель частоты», в правой — расположена ручка плавного регулирования выходного напряжения генератора — «Рег. вых.», индикатор выходного напряжения, кнопки ступенчатого изменения выходного напряжения — «Пределы шкалы», тумблер включения сети — «Сеть», переключатель внутренней нагрузки генератора — «600 Ом» и гнездо выходного сигнала — «Выход».

При работе генератора на нагрузку с входным сопротивлением, значительно превышающим 600 Ом, для правильного деления напряжения аттенуатором, необходимо включить внутреннюю нагрузку «600 Ом».

Следует отметить, что при работе генератора с большим ослаблением выходного напряжения на неэкранированных концах измерительного кабеля могут наводиться значительные напряжения помех. В этих случаях рекомендуется использовать измерительный кабель с двумя коаксиальными гнездами и заземлять только корпус генератора.

Приложение П. 4. Электронный осциллограф С1-72

Электронно-лучевой осциллограф является универсальным измерительным прибором широкого назначения, в том числе для исследования быстроизменяющихся электрических, периодических и непериодических процессов. Этот прибор можно использовать также для измерения напряжения, частоты, фазового сдвига, временных интервалов и многих других физических величин, преобразованных в электрические. Широкое применение электронного осциллографа при различных исследованиях обусловлено возможностью его использования как для качественной, так и для количественной оценки исследуемых величин и процессов.

Осциллограф С1-72 позволяет: 1) наблюдать форму импульсов обеих полярностей, длительностью от 0,05 мкс до 500 мс и размахом от 20 мВ до 60 В, а с выносным делителем 1 : 10 от 200 мВ до 500 В; 2) наблюдать периодические сигналы от 5 Гц до 10 МГц; 3) измерять амплитуды исследуемых сигналов от 40 мВ до 60 В, а с выносным делителем — до 500 В; 4) измерять временные интервалы от 0,2 мкс до 500 мс.

Осциллограф имеет: 1) входное сопротивление усилителя вертикального отклонения при открытом входе $1 \text{ МОм} \pm 3 \%$ с параллельной емкостью $40 \text{ пФ} \pm 10 \%$; при использовании выносного делителя 1 : 10 входное сопротивление — $10 \text{ МОм} \pm 10 \%$ с параллельной емкостью не более 15 пФ; вход усилителя может быть открыт « \approx » и закрыт « \sim » (см. рис. П. 6); 2) открытый вход, предназначенный для исследования электрических сигналов, содержащих в спектре постоянную составляющую, и закрытый — для сигналов, не содержащих постоянную составляющую или для ее отделения; 3) погрешность измерения амплитуд импульсных сигналов от 40 мВ до 60 В при длительности импульсов не менее 0,2 мкс и частотой не более 2 МГц при изображении от двух до шести делений на экране, не превышающую $\pm 10 \%$; 4) погрешность измерения временных интервалов от 0,2 мкс до 50 мс на развертках с коэффициентом от 0,05 мкс/дел до 5 мс/дел, не превышающую 10 %.

а для интервалов до 500 мс — 20 %; 5) минимальный коэффициент отклонения тракта вертикального отклонения луча, составляющий 20 мВ/дел; калиброванный коэффициент отклонения, устанавливаемый ступенями от 20 мВ/дел до 10 В/дел; 6) диапазон калиброванных коэффициентов развертки от 50 мс/дел до 0,05 мкс/дел, разбитый на 19 фиксированных поддиапазонов; развертка может быть ждущей и непрерывной.

На рис. П. 5 представлена структурная схема осциллографа С1-72.

Исследуемый сигнал подается на входное гнездо «Вход Y», через который поступает на входной attenuator — частотно-компенсирован-

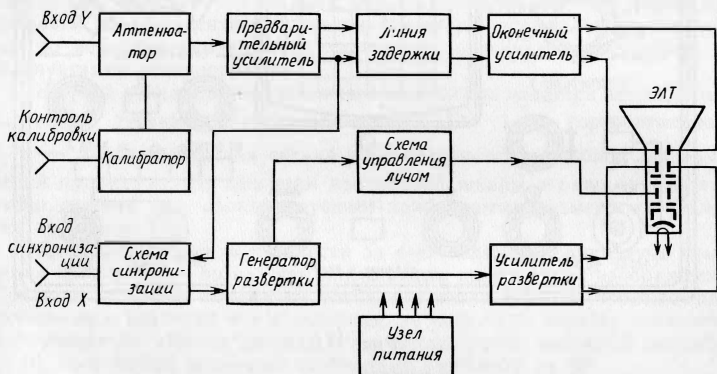


Рис. П.5

ный делитель напряжения, с помощью которого выбирают сигнал, удобный для наблюдения и исследования на экране электронно-лучевой трубки (ЭЛТ) осциллографа. С выхода attenuатора сигнал подается на предварительный усилитель. Сигнал, усиленный предварительным усилителем, проходит через линию задержки. Линия задержки обеспечивает возможность наблюдения переднего фронта коротких исследуемых импульсов путем создания в канале вертикального отклонения задержки исследуемого сигнала на время, несколько превышающее время образования рабочего хода используемой развертки. Оконечный усилитель усиливает исследуемый сигнал до значения, достаточного для наблюдения его на экране ЭЛТ. Одновременно с выхода предварительного усилителя исследуемый сигнал поступает на вход схемы синхронизации и запуска развертки, под действием которого схема вырабатывает прямоугольные импульсы постоянной амплитуды независимо от значения и формы входного сигнала. Эти импульсы передаются на вход генератора развертки, вырабатывающего пилообразное напряжение, которое усиливается в усилителе развертки и затем поступает на горизонтально отклоняющие пластины ЭЛТ. В схеме развертки предусмотрена ступенчатая регулировка частоты пилообразного напряжения развертки, осуществляемая соответствующей установкой переключателя «Время/делен» генератора развертки.

Схема управления лучом ЭЛТ формирует прямоугольные импульсы, с помощью которых осуществляется гашение луча во время обратного хода развертки. Калибратор, генератор прямоугольных импульсов постоянной амплитуды и частоты, служат для производства калибровки

коэффициентов усиления вертикального и горизонтального отклонений луча.

Блок питания обеспечивает напряжением все блоки прибора. На передней панели прибора (рис. П. 6) находятся все органы управления

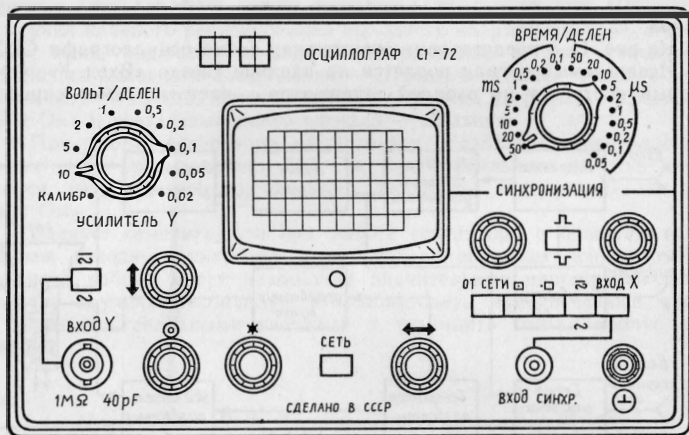


Рис. П.6

и подсоединения, снабженные соответствующими надписями, а также экран электронно-лучевой трубки. В приборе используется ЭЛТ типа 8ЛО4И. Экран ЭЛТ снабжен прозрачной шкалой, используемой для измерений изображений по вертикали и горизонтали.

Порядок работы с осциллографом следующий: для наблюдения и измерения основных параметров (амплитуды, частоты, временных интервалов и т. д.) исследуемого сигнала необходимо выполнять следующие условия.



1. Перед включением прибора в сеть предварительно установить переключатель «Вольт/делен» в положение 10, ручку «Стабильность» — в крайнее правое положение, переключатель «Время/делен» и все остальные ручки — в крайние положения, нажать кнопку синхронизации «от сети» и кнопку переключения входа. Используя коаксиальный кабель, подать исследуемый сигнал на «Вход Y».

2. Включить прибор в сеть, нажав кнопку «Сеть», и дать ему прогреться в течение 10—15 мин.

3. Выбрать тип развертки — автоколебательный (непрерывный) или ждущий. Ждущий режим следует использовать в тех случаях, когда исследуемый импульс является непериодическим с большим отношением длительности импульса к паузе. В других случаях применяется автоколебательный режим развертки. Для этого ручка «Стабильность» должна быть установлена в крайнее правое положение.



При использовании ждущей развертки ручку «Стабильность» необходимо повернуть против часовой стрелки на 5—10° от точки срыва развертки, четкого ее запуска добиваются вращением ручки «Уровень».

4. Выбрать вид синхронизации: исследуемым сигналом, внешним синхронизирующим импульсом или от сети. Для этого необходимо нажать соответствующую кнопку (☐ • ☐ и «от сети») коммутатора

синхронизации и, вращая ручку «Уровень», добиться устойчивого и удобного для наблюдения изображения сигнала на экране ЭЛТ. Ручками ( ) регулировки яркости и фокусировки следует отрегулировать яркость и фокусировку изображения на экране трубки.

5. Изменяя положение переключателем «Вольт/делен» и «Время/делен», получить удобный для исследования вертикальный и горизонтальный размеры изображения на экране ЭЛТ. При нарушении устойчивости изображения ручками «Стабильность» и «Уровень» получить устойчивое и неподвижное изображение на экране.


Измерение амплитуды исследуемого сигнала. Перед измерением амплитуды исследуемого сигнала необходимо произвести проверку калибровки коэффициента отклонения усилителя вертикального отклонения по методике, указанной в техническом описании и инструкции по эксплуатации осциллографа.

На вход усилителя вертикального отклонения подается исследуемый сигнал и ручками вертикального () и горизонтального () перемещения сигнал устанавливается в удобное для измерений положение. По делениям прозрачной шкалы экрана определяют число делений « h », соответствующее наибольшему размеру изображения на экране.

Для уменьшения погрешности за счет толщины линии луча измерения производятся по нижним или верхним краям линии изображения. При этом значение амплитуды сигнала в вольтах равно произведению измеряемого значения « h » в делениях, на цифровую отметку показаний переключателя «Вольт/делен». Если используется выносной делитель 1 : 10, полученный результат необходимо умножить на 10.

Измерение частоты исследуемого периодического сигнала. Частоту исследуемого периодического сигнала можно определить по измеренному значению его периода T : $f = 1/T$.

Установив на экране полтора или более периодов исследуемого сигнала, измеряют его значение в делениях по шкале A прозрачной сетки. Значение периода определяется как произведение измеренного значения A в делениях на цифровую отметку показаний переключателя «Время/делен». По рассчитанному периоду T определяют частоту исследуемого сигнала.

Частоту исследуемого синусоидального сигнала можно определить также методом сравнения с известной (эталонной) частотой по фигурам Лиссажу. В этом случае через «Вход синхр.» усилителя горизонтального отклонения (при нажатой кнопке «Вход X») подается синусоидальное напряжение от генератора стандартных сигналов, а на «Вход Y» — исследуемый синусоидальный сигнал. Соответствующей кнопкой () коммутатора вида синхронизации включается синхронизация внешним сигналом. Изменением положения переключателя «Время/деле» установить удобное для наблюдений изображение фигуры Лиссажу на экране ЭЛТ. Плавно изменяя частоту генератора стандартных сигналов, добиваются вращающейся простейшей фигуры Лиссажу (эллипса) на экране ЭЛТ. Стабилизация этой фигуры на экране соответствует равенству частот $f_y = f_x$ исследуемого и эталонного сигналов. При кратном соотношении частот на экране возникает более сложная фигура Лиссажу, исходя из которой частоту исследуемого сигнала определяют по формуле

$$f_y/f_x = h_x/h_y \quad \text{или} \quad f_y = f_x h_x/h_y,$$

где f_y — частота исследуемого периодического сигнала; f_x — частота

напряжения генератора стандартных сигналов; h_y и h_x — число касаний фигуры Лиссажу по вертикали и горизонтали.

Приложение П.5. Первая помощь при поражении электрическим током

Человек является проводником электрического тока и его электрическое сопротивление зависит от состояния кожного покрова (тонкая, грубая, сухая, потная кожа и т. д.), душевного состояния человека и других факторов. Среднее значение электрического сопротивления человеческого тела находится в пределах 100—200 000 Ом. При неблагоприятных условиях (мокрая кожа; влажный, токопроводящий пол и т. д.) значение его сопротивления может уменьшиться до 100 Ом и ниже.

Человеческий организм способен пропускать через себя без опасных последствий незначительные токи. Поэтому их возрастание свыше допустимых значений может привести к тяжелым последствиям. Установлено, что при токах в 0,01—0,02 А у человека появляются болезненные судороги. Токи в 0,05—0,1 А опасны для человека, а свыше 0,1 А их можно считать смертельными.

Поражение людей электрическим током может произойти как при высоком, так и низком напряжении. При этом большое значение имеют окружающие условия.

Прикосновение человека к токоведущим частям вызывает судорожное сокращение мышц пострадавшего. Поэтому пострадавший не может самостоятельно освободиться от действия тока. Если после поражения электрическим током пострадавший находится в соприкосновении с частями, находящимися под напряжением, его необходимо освободить от действия тока, соблюдая меры предосторожности, так как оказывающий помощь сам может попасть под напряжение.

Освобождение пострадавшего от действия тока. Для освобождения пострадавшего от действия тока необходимо немедленно отключить ту часть установки, к которой прикоснулся пострадавший. Если отключение электрической установки нельзя произвести быстро, необходимо отделить пострадавшего от частей, находящихся под напряжением. Для этого можно воспользоваться сухой доской или палкой, сухой одеждой или другими токонепроводящими предметами для воздействия либо на токоведущую часть, либо на пострадавшего с целью обеспечения разрыва цепи тока. При освобождении пострадавшего от действия тока надо избегать прикосновения к окружающим предметам и частям тела пострадавшего, не покрытым одеждой. Не следует также прикасаться к обуви пострадавшего, находящегося под напряжением, так как она может оказаться токопроводящей.

Необходимо пользоваться резиновыми перчатками, галошами и другими защитными средствами. Для отделения пострадавшего от токоведущих частей при низком напряжении (до 250 В) можно воспользоваться, например, сухой доской, подсунув ее под тело пострадавшего и изолировав таким образом его от токоведущих частей. При необходимости для разрыва цепи тока, протекающего через пострадавшего, можно воспользоваться острым изолированным инструментом (ножом, топором и т. д.).

Меры первой помощи. Пораженного электрическим током укладывают на спину, на валик из одежды, чтобы голова откинулась назад, а шея вместе с подбородком составляла примерно прямую линию. Оказывающий помощь становится на колени сбоку от пострадавшего, удерживая одной рукой его голову в запрокинутом назад положении

и слегка оттягивая ее другой рукой книзу. На рот пострадавшего накладывается кусочек марли или бинта, затем оказывающий помощь делает глубокий вдох и, прижав через марлю свои губы ко рту пострадавшего, с усилием вдует ему в легкие выдыхаемый воздух. При этом происходит вдох. При выдохе оказывающий помощь отводит свою голову и оттягивает одной рукой нижнюю губу пострадавшего. При этом выдыхаемый воздух выходит из легких пострадавшего. Искусственное дыхание можно производить аналогичным образом, подавая воздух через нос пострадавшего. При этом частота вдохов и выдохов должна соответствовать частоте дыхания человека (10—20 раз/мин).

Искусственное дыхание необходимо делать до тех пор, пока пострадавший не начнет дышать самостоятельно.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электротехника/Под ред. В. Г. Герасимова. — М.: Высшая школа, 1983. — 480 с.
2. Касаткин А. С., Немцов М. В. Электротехника. — М.: Энергоатомиздат, 1983. — 440 с.
3. Борисов Ю. М., Липатов Д. Н., Зорин Ю. Н. Электротехника. — М.: Энергоатомиздат, 1985. — 552 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	3
§ 1. Правила внутреннего распорядка и техники безопасности при выполнении лабораторных работ	5
§ 2. Общие методические рекомендации и указания по выполнению лабораторных работ	7
§ 3. Краткое описание универсального лабораторного стенда типа ЭВ-4	9
Лабораторная работа 1. Измерение токов и напряжений приборами непосредственного отсчета в цепи постоянного тока. Измерение сопротивлений методом амперметра и вольтметра	12
Лабораторная работа 2. Исследование разветвленной электрической цепи постоянного тока с линейными и нелинейными элементами	19
Лабораторная работа 3. Неразветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями. Резонанс напряжений	27
Лабораторная работа 4. Разветвленная электрическая цепь синусоидального тока с активно-реактивными сопротивлениями. Резонанс токов	36
Лабораторная работа 5. Трехфазные электрические цепи при соединении потребителей электроэнергии звездой и треугольником	46
Лабораторная работа 6. Переходные процессы в линейных электрических цепях	59
Лабораторная работа 7. Выпрямительные устройства	73
Лабораторная работа 8. Транзисторы и применение их в усилителях	86
Лабораторная работа 9. Двухкаскадный усилитель с обратной связью на транзисторах	101
Лабораторная работа 10. Катушка индуктивности с магнитопроводом	116
Лабораторная работа 11. Однофазный магнитный усилитель	127
Лабораторная работа 12. Однофазный трансформатор	137
Лабораторная работа 13. Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором	154
Лабораторная работа 14. Электродвигатель постоянного тока	172
Лабораторная работа 15. Трехфазный синхронный генератор	189
Лабораторная работа 16. Трехфазный синхронный электродвигатель	207
Лабораторная работа 17. Однофазные бесконтактные сельсины	219
Приложения	230
Литература	239