ВВЕДЕНИЕ

Электротехника в широком понимании – это наука, изучающая способы использования электрических и магнитных явлений для практических целей. Электротехника охватывает большой комплекс вопросов и разделена на ряд областей.

Одной из важнейших областей электротехники является электроэнергетика, которая рассматривает вопросы производства электрической энергии (из других видов энергии), передачи энергии на дальние расстояния, распределение ее между потребителями и преобразование электрической энергии в другие виды энергии – механическую, тепловую, химическую и т. д.

На основе электрификации все шире внедряется комплексная механизация и автоматизация производственных процессов. Интенсивно развивается электротехнология – электротермические и электролитические способы получения и обработки металлов. Электроэнергия используется для электросварки, закалки стали токами высокой частоты, сушки древесины и т. д.

Электроника является областью электротехники и рассматривает движение заряженных частиц в вакууме, газовой среде или твердом теле и управление этим движением с целью различного рода преобразования электрических величин или одного вида энергии в другой. Электроника охватывает вопросы производства и применения электронных приборов и других устройств, выполняющих функции преобразования энергии, управления отдельными механизмами, станками, поточными линиями, а также контроль над ними.

Обширное применение электротехники во всех отраслях народного хозяйства и все большее внедрение электроники в промышленность настоятельно требуют знания молодыми работниками основных вопросов электротехники и электроники.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Касаткин, А. С. Электротехника: учеб. пособие / А. С. Касаткин, М. В. Немцов. – 8-е изд., испр. – Москва: Академия, 2003. – 544 с.

2. Иванов, И. И. Электротехника: учеб. / И. И. Иванов, Г. И. Соловьев, В. С. Равдоник. – 2-е изд., перераб. и доп. – СПб.: Лань, 2003. – 496 с.

3. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника. Электрические измерения и электроизмерительные приборы: метод. указания / К. Л. Пузевич, Н. И. Скакун. – Горки: БГСХА, 2016. – 40 с.

4. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника. Теория электрических цепей: курс лекций / К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2020. – 86 с.

5. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника: УМК для самостоятельной работы студентов / К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2020. – 227 с.

6. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника. Трансформаторы и электрические

машины: курс лекций / К. Л. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2022. – 126 с.
7. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника. Испытание синхронного генератора: метод. указания / К. Л. Пузевич, С. И. Козлов, В. В. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2022. – 22 с.
8. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника. Исследование цепи постоянного тока: метод. указания / К. Л. Пузевич, С. И. Козлов, В. В. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2022. – 27 с.
9. Пузевич, К. Л. Электротехника и электроника. Исследование цепи переменного синусоидального тока с параллельным соединением дросселя и конденсатора: метод. указания / К. Л. Пузевич, С. И. Козлов, В. В. Пузевич. – Горки: БГСХА, 2022. – 20 с.

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные работы, представленные в настоящем практикуме, кроме расчетных, выполняются на лабораторных установках, которыми оснащена лаборатория электротехнического обеспечения сельскохозяйственного производства.

***Подготовка к лабораторной работе*:**

1. Предварительно необходимо ознакомиться с правилами внутреннего распорядка и техники безопасности.

2. По лекциям и соответствующим литературным источникам изучить теоретическую часть, относящуюся к данной работе.

3. Подготовить бланк отчета по лабораторной работе согласно методическим указаниям.

Студенты, явившиеся на занятие неподготовленными, к выполнению лабораторной работы не допускаются.

Выполнение лабораторной работы:

1. На рабочем месте необходимо ознакомиться с приборами, аппаратами и прочим оборудованием, записать в отчет технические данные объектов и средств исследования. При этом нужно выяснить, какие зажимы приборов соответствуют тем или иным точкам электрической схемы и в какие положения нужно установить органы управления блока питания.

2. Сборку электрических цепей следует производить, пользуясь соответствующей электрической схемой и указаниями преподавателя.

3. При сборке цепей следует избегать излишнего пересечения соединительных проводов.

4. При сборке цепей постоянного тока необходимо соблюдать полярность включения приборов в соответствии с полярностью источника тока.

5. Во время выполнения работы необходимо следить за показания-

ми приборов и не перегружать их.

6. По окончании выполнения лабораторной работы необходимо отключить лабораторный стенд, показать преподавателю полученные результаты и с его разрешения разобрать электрическую схему.

Уход из лаборатории до окончания занятий не разрешается. Время, отводимое студентам для выполнения лабораторной работы, равно двум академическим часам.

Отчет по лабораторной работе оформляется согласно общепринятым на факультете механизации сельского хозяйства нормам и правилам. Все вычисления следует производить в системе единиц СИ. Построение экспериментальных кривых выполняется в прямоугольной системе координат. Координатные оси должны иметь обозначения изображаемых величин, размерность и масштаб.

Отчет должен содержать:

1) наименование работы и ее номер, цель работы в краткой формулировке;

2) электрическую схему лабораторной установки (выполняется карандашом с соблюдением правил начертания и обозначения элементов согласно системе ЕСКД);

3) перечень используемой аппаратуры, ее технические данные, условные обозначения;

4) основные расчетные формулы с подробной расшифровкой условных обозначений и указанием единиц измерения;

5) результаты измерений и расчетов;

6) графические зависимости и векторные диаграммы (при необходимости);

7) анализ результатов работы и выводы.

Отчеты, выполненные с отступлениями от вышеперечисленных требований, к защите не допускаются.

Лабораторная работа считается защищенной, если студент показал знание цели, физической сущности исследуемых процессов, методики выполнения опытов, может объяснить и проанализировать полученные результаты и разъяснить основные выводы.

ТРЕБОВАНИЯ ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

1. К самостоятельной работе в лаборатории допускаются студенты, физически здоровые и прошедшие инструктаж по охране труда.

2. Не допускается появление в лаборатории в состоянии алкогольного, наркотического или токсического опьянения, а также распитие спиртных напитков, употребление наркотических или токсических веществ вовремя занятий и установленных перерывов.

3. Студент несет ответственность за нарушение требований техники безопасности в соответствии с законодательством Республики Беларусь.

4. При выполнении лабораторной работы на студентов могут оказывать воздействие следующие опасные и вредные производственные факторы: движущиеся узлы, детали приборов, оборудования, электрическое напряжение, падение предметов.

5. Студенты получают задание на выполнение лабораторной работы у преподавателя. Выполнять работу необходимо только в соответствии с полученным заданием. Не приступать к самостоятельной работе, не освоив безопасные приемы ее выполнения.

6. В звене, выполняющем работу, должно быть не более 5 студентов, причем одного из них преподаватель назначает старшим. Члены звена обязаны согласовывать с ним все свои действия при выполнении лабораторной работы.

7. Студенты не должны приступать к выполнению лабораторной работы, не убедившись в исправности оборудования, приборов и приспособлений, в частности, если нарушена изоляция проводов, неисправны разъемы или вилка силового кабеля, во избежание поражения электрическим током.

8. Запрещается самостоятельно запускать оборудование и включать приборы, работа на которых не разрешена.

9. На каждом рабочем месте должны быть методические указания по выполнению данной лабораторной работы, учитывающие требования безопасности. Какие-либо действия, не предусмотренные этими указаниями, не допускаются.

10. Во избежание травмирования электрическим током на включенном, а также выключенном стенде нельзя трогать неизолированные токоведущие части. Провод нужно поддерживать за изолированную часть, гайку зажима завинчивать, держа за пластмассовую головку.

11. Подключение в электрическую сеть приборов и оборудования производить только с разрешения преподавателя. При подключении необходимо избегать образования петель, сгибов и защемления питающего кабеля.

12. Перед каждым включением лабораторной установки производится голосовое предупреждение: «внимание, пуск!».

13. Включенное электрооборудование, приборы запрещается оставлять без присмотра не только после полного окончания работы, но и при выходе из лаборатории во время короткого перерыва.

14. Запрещается самостоятельно вскрывать корпуса приборов (или задние крышки) и просовывать в отверстия, которые имеются в корпусах приборов, металлические и другие предметы, так как это может привести к поражению электрическим током.

15. Запрещается оставлять в неустойчивом положении приборы, макеты и другое оборудование.

16. Во время установленных перерывов запрещается производить какие-либо работы.

17. В случае прекращения подачи электроэнергии, при появлении посторонних шумов, искр, запаха гари, дыма и т. п. следует отключить оборудование и приборы, остановить выполнение лабораторной работы и поставить в известность преподавателя.

18. Запрещается самостоятельно устранять неисправности оборудования лаборатории, отодвигать от стен лабораторные столы, стенды, просовывать за стенды руки.

19. Обо всех неисправностях оборудования, приборов, инструментов, замеченных во время выполнения лабораторной работы, необходимо сообщить преподавателю.

20. При возникновении ситуаций, которые могут привести к травмированию студента или авариям, необходимо остановить выполнении лабораторной работы и немедленно сообщить о возникшей ситуации преподавателю.

21. Нужно помнить, что отрицательное действие электрического тока на организм пострадавшего вплоть до остановки сердечной деятельности и дыхания может сказаться не сразу, а спустя некоторое время. Именно по этой причине пострадавшего нужно как можно быстрее доставить в больницу.

22. В случае недомогания немедленно прекратить выполнение лабораторной работы, известив об этом преподавателя.

23. После окончания выполнения лабораторной работы необходимо

отключить от электросети все приборы и оборудование, используя сначала выключатель на лабораторной установке, а затем автомат включения. Следует привести в порядок свое рабочее место и сообщить преподавателю о завершении работы.

24. Уходя из лаборатории, нужно выключить освещение.

Лабораторная работа № 1.
ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ И ЭЛЕКТРОИЗМЕРИТЕЛЬНЫЕ ПРИБОРЫ

Цели работы: 1. Изучить конструкции измерительных механизмов наиболее распространенных электроизмерительных приборов (вольтметр, амперметр, ваттметр) различных систем.

2. Получить навыки определения технических характеристик по условным обозначениям на шкалах приборов и выяснить, для каких измерений нужно применять эти приборы.

3. Изучить схемы включения приборов в электрическую цепь и практически освоить измерения таких электрических величин, как сила тока, напряжение и потребляемая мощность.

В качестве объектов изучения и средств исследования приняты: вольтметр PV, амперметр PA, ваттметр PW, счетчик электрической энергии PI.

1.1. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ПРИБОРЫ

1.1.1. Общие сведения об электромеханических приборах и измерительных механизмах

Чтобы следить за правильной эксплуатацией электрических установок, необходимо систематически проводить измерения электрических величин, характеризующих работу этих механизмов.

Измерение – это определение физической величины опытным путем с помощью электроизмерительных приборов.

Электромеханический прибор состоит из двух основных частей: измерительной цепи и измерительного механизма.

В измерительном механизме электрическая энергия преобразуется в механическую энергию перемещения подвижной части. Обычно применяется угловое перемещение, поэтому в дальнейшем будут рассматриваться не силы, действующие в приборе, а моменты.

Если бы повороту подвижной части ничто не препятствовало, то она при любом значении измеряемой величины, отличном от нуля, повернулась бы до упора. Для того чтобы угол отклонения зависел от измеряемой величины, в приборе при повороте подвижной части создается противодействующий момент, направленный навстречу вращающему и зависящий от угла поворота.

Измерительные приборы различают: по назначению, роду измеряе-

мого тока, принципу действия, классу точности, форме корпуса, положению при измерениях, характеру применения.

На шкалу каждого прибора наносятся условные обозначения (рис. 1.1).

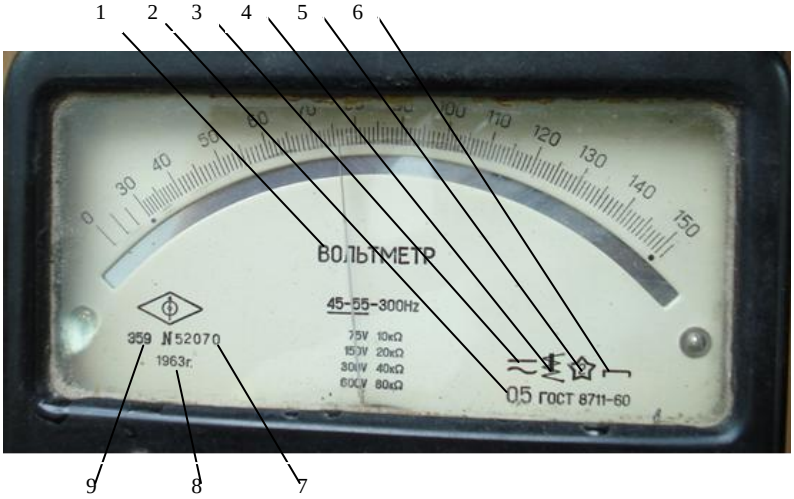


Рис. 1.1. Условные обозначения на шкалах электроизмерительных приборов:
1 – наименование прибора; *2* – класс точности; *3* – род тока; *4* – система прибора; *5* – испытательное напряжение; *6* – положение при измерениях; *7* – заводской номер; *8* – год выпуска; *9* – марка прибора

По назначению приборы подразделяются на следующие виды: амперметры, вольтметры, омметры, ваттметры, счетчики, частотомеры и др. На шкалах многопредельных приборов наносится их наименование, а на приборы с именованной шкалой – условное обозначение. Наиболее распространенные обозначения приведены в табл. 1.1.

Т а б л и ц а 1.1. **Условные обозначения электроизмерительных приборов**

Название прибора	Измеряемая физическая величина	Обозначения в схемах и на шкалах
Амперметр	Ток	A
Вольтметр	Напряжение	V
Ваттметр	Мощность	W
Омметр	Сопротивление	Ω
Частотомер	Частота	Hz
Счетчик	Ампер-часы	Ah

Измерительные приборы можно применять в цепях переменного или постоянного тока. Однако существуют приборы, предназначенные для включения в цепь и переменного и постоянного токов. Условные обозначения для соответствующего рода тока приведены в табл. 1.2.

Таблица 1.2. **Условные обозначения рода тока**

Род тока	Обозначение
Постоянный	⎓
Переменный	∼
Постоянный и переменный	⎓∼
Трехфазный	≋

Корпус прибора защищает измерительный механизм от внешних воздействий и от попадания в него пыли, а в отдельных случаях – воды и газов. Корпуса чаще всего выполняются из пластмассы. Размеры и форма корпусов весьма разнообразны.

По форме корпуса приборы бывают круглые, квадратные, прямоугольные, секторообразные. По характеру применения: стационарные (жестко укрепленные на месте установки) и переносные. По положению при измерениях – вертикальные, горизонтальные и устанавливаемые под некоторым углом.

Промышленность выпускает электроизмерительные приборы трех эксплуатационных групп: А, Б и В, характеризующих допустимую температуру окружающей среды, при которой можно эксплуатировать данный прибор. Приборы различных групп могут эксплуатироваться при следующих температурах окружающей среды:

группа А: 0 – +35 °С;

группа Б: –30 – +40 °С;

группа $В_1$: –40 – +50 °С;

группа $В_2$: –50 – +60 °С.

Принадлежность прибора к эксплуатационным группам Б и В указывается на шкале. Приборы эксплуатационной группы А обычно обозначений на шкале не имеют.

Так как электроизмерительные приборы включаются непосредственно в электрическую цепь электроустановки, то их обмотка находится под напряжением. Чтобы обезопасить обслуживающий персонал, изоляция обмотки приборов испытывается на соответствующее напряжение, значение которого также указывается на шкале.

В табл. 1.3 приведены условные обозначения вышеуказанных ха-

рактеристик.

Таблица 1.3. **Дополнительные обозначения на приборах**

Наименование	Обозначение
Испытательное напряжение изоляции 500 В	
Испытательное напряжение изоляции 2 кВ	
Испытательное напряжение изоляции (для старых типов приборов)	2 kV
Рабочее положение шкалы прибора под некоторым углом	
Рабочее положение шкалы прибора горизонтальное	
Рабочее положение шкалы прибора вертикальное	⊥
Исполнение прибора в зависимости от условий эксплуатации	Б, $В_1$, $В_2$
Класс точности	1,5

По принципу действия электроизмерительные приборы относят к следующим наиболее распространенным системам:

- электромагнитной;
- магнитоэлектрической;
- электродинамической;
- индукционной;
- электростатической;
- вибрационной;
- термоэлектрической.

Принадлежность к каждой из систем указывается на шкале прибора специальным значком (табл. 1.4).

Таблица 1.4. **Условные обозначения систем приборов**

Тип системы прибора	Условное обозначение принципа действия прибора
1	2
Магнитоэлектрическая с подвижной рамкой	
Магнитоэлектрическая с подвижным магнитом	
Электромагнитная	
Электродинамическая	
Ферродинамическая	
Индукционная	

Окончание табл. 1.4.

1	2
Электростатическая	
Вибрационная (язычковая)	
Термоэлектрическая	

Кроме перечисленных, приборы могут иметь и другие обозначения. Например, на приборы, предназначенные для работы в условиях тропического климата, наносится знак «Т».

Для определения числового значения измеряемой величины приборы имеют отсчетные приспособления, состоящие из шкалы и указателя.

Отсчетное устройство измерительного прибора – часть прибора, предназначенная для отсчитывания его показаний. Отсчетное устройство аналогового прибора обычно состоит из шкалы и указателя, причем подвижным может быть либо указатель, либо шкала. По типу указателя отсчетные устройства подразделяются на стрелочные и световые. В стрелочных отсчетных устройствах стрелка своим концом перемещается относительно отметок шкалы. Конец стрелки может быть копьевидным (рис. 1.2, *а*) или выполненным в виде ножа (рис. 1.2, *б*), а также натянутой нити. В последних двух случаях шкалы снабжаются зеркалом *3* для устранения погрешности отсчета, вызванной параллаксом (параллакс – видимое смещение предмета из-за перемены места наблюдения).

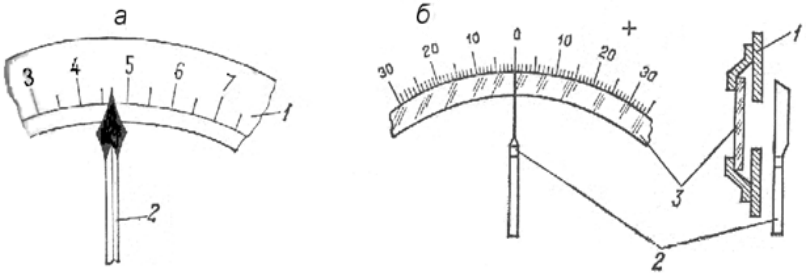


Рис. 1.2. Стрелочные отсчетные устройства с копьевидной (*а*) и ножевидной (*б*) стрелкой:
1 – шкала; *2* – стрелка; *3* – зеркало

В качестве зеркала используется пластинка посеребренного стекла,

устанавливаемая непосредственно под шкалу. Для точного определения показаний электроизмерительного прибора глаз наблюдателя должен находиться в таком положении, при котором стрелка полностью закрывает собой свое изображение в зеркале.

В световых отсчетных устройствах (рис. 1.3) роль стрелки выполняет световой луч, отраженный от зеркальца, скрепленного с подвижной частью прибора. От положения последней зависит положение светового изображения на шкале, по которому отсчитывают показания. Световое отсчетное устройство позволяет устранить погрешность от параллакса и повысить чувствительность прибора за счет увеличения длины указателя и удвоения угла его поворота.

Рис. 1.3. Световое отсчетное устройство

Отсчетное устройство цифрового прибора позволяет получить показание непосредственно в цифровой форме. Для создания изображений цифр применяются цифровые индикаторы различной конструкции. Механические индикаторы представляют собой несколько роликов или дисков с цифрами по окружности и ряд окошечек, в которых появляются цифры отдельных роликов (дисков). Такими отсчетными устройствами снабжены, например, счетчики электроэнергии. Электромеханические индикаторы содержат подвижные части с изображениями цифр, перемещаемые электромеханическими приводными устройствами. В электрических индикаторах применяются лампы накаливания, люминесцентные или газоразрядные элементы и электронолучевые трубки, образующие изображения цифр.

Шкала прибора служит для отсчета значений измеряемой величины. Кроме того, на шкалу обычно наносят условные обозначения, соответствующие характеристикам данного прибора (см. рис. 1.1).

В многопредельных приборах шкала имеет определенное число условных делений, по которым путем пересчета определяют измеряемую величину в нужных единицах. Шкалы других приборов градуируют непосредственно в значениях измеряемой величины. Это шкалы непосредственного отсчета.

Различают равномерные и неравномерные шкалы. Достоинством равномерной является постоянство масштаба вдоль всей шкалы, что обеспечивает простоту отсчета измеряемой величины в любой части шкалы.

По степени точности измерительные приборы делятся на 8 классов (ГОСТ 1845–59): 0,05; 0,1; 0,2; 0,5; 1,0; 1,5; 2,5 и 4. Цифры указывают основную погрешность в процентах.

Приборы классов точности 0,05 и 0,1 считаются контрольными; 0,2; 0,5 и 1 – лабораторными; 1,5 и 2,5 – техническими; 4 – учебными.

Контрольные приборы имеют зеркальную шкалу и ножевидную стрелку.

У лабораторных приборов есть ножевидная стрелка, но может не быть зеркальной шкалы.

Технические и учебные приборы имеют копьевидную стрелку, но не имеют зеркальной шкалы.

Несмотря на то, что приборы разных групп по своему устройству существенно различаются, имеется ряд деталей и узлов, общих для всех электромеханических приборов.

Способ установки подвижной части определяется выбором элементов, создающих противодействующий момент. Применяется установка на опорах (в случае спиральных пружинок), на растяжках и на подвесе.

Опоры состоят из кернов и подпятника. Керны представляют собой отрезки стальной проволоки длиной 5–7 мм, диаметром 0,50–0,75 мм, заточенные с одной стороны на конус с углом 45–00° и с радиусом закругления 0,01–0,15 мм. Подпятники чаще всего изготовляются из агата, корунда с выточенным в них под углом около 80° коническим углублением, заканчивающимся закруглением с радиусом 0,05–0,5 мм.

На рис. 1.4 показано устройство опоры для установки подвижной части. Керн *1* запрессован в буксу *2*, приклеенную к подвижной части *3*. В случае применения оси в виде алюминиевой трубки керн запрессовывается в ось. Камень *4* завальцован в винт *5*, укрепленный в непод-

вижной части *6* измерительного механизма. Наличие винта позволяет установить необходимый зазор между керном и камнем.

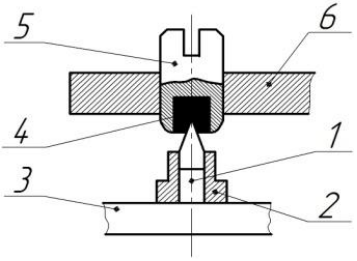


Рис. 1.4. Устройство опоры:
1 – керн; *2* – букса; *3* – подвижная часть;
4 – камень; *5* – винт; *6* – неподвижная часть

Опоры являются важнейшим узлом прибора и во многом определяют его качество. Для уменьшения погрешности от трения площадь соприкосновения между керном и подпятником должна быть весьма малой. Это приводит к тому, что, хотя вес подвижной части обычно не превышает нескольких граммов, напряжения в паре керн-подпятник достигают очень больших величин.

Общие детали подвижной части на опорах представлены на рис 1.5.

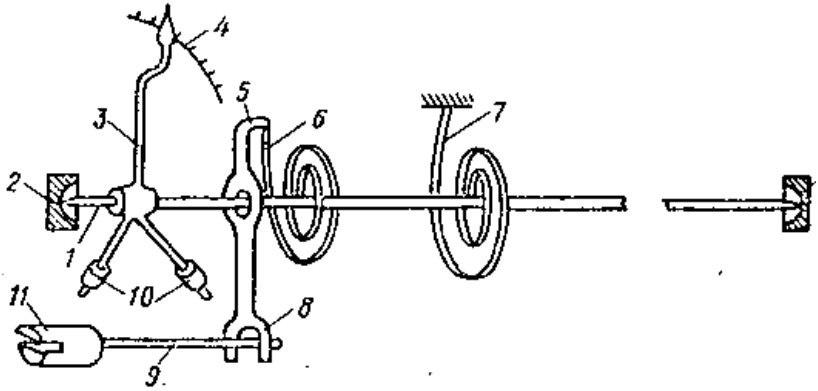


Рис. 1.5. Общие детали подвижной части в опорах:
1 – ось; *2* – подпятники; *3* – стрелка; *4* – шкала; *5* – поводок корректора;
6, 7 – пружинки; *8* – вилка; *9* – ось корректора; *10* – грузики; *11* – винт

Ось *1* заканчивается кернами, опирающимися на подпятники *2*. К оси прикреплены одним из своих концов пружинки *6* и *7*, которые служат для создания противодействующего момента. Пружинки часто используются также и в качестве токоподводов к обмотке подвижной части. Пружинки выполняются из оловянно-цинковой и некоторых других сортов бронзы. Пружинка *7* другим концом прикрепляется к неподвижным частям прибора, а пружинка *6* – к поводку *5* корректора. Корректор служит для установки стрелки на нуль перед измерениями посредством вращения винта *11*, выведенного на переднюю панель прибора. Ось *9* корректора расположена эксцентрично. Поэтому поворот винта *11* перемещает вилку *8*, что вызывает изменение угла закручивания пружинки *6* и перемещение стрелки *3* по шкале *4*. Грузики *10* служат для уравновешивания подвижной части, т. е. для устранения влияния моментов сил тяжести на положение подвижной части.

Недостатками установки подвижной части на опорах являются: наличие погрешности от трения, недостаточная надежность при воздействиях на прибор ударов, тряски и вибраций, большая потребляемая мощность и, следовательно, малая чувствительность.

Эти недостатки в значительной степени устраняются при креплении подвижной части на растяжках.

Растяжки представляют собой упругие ленты, прикрепляемые одним концом к подвижной части, а другим – к неподвижным деталям прибора. Если в таких лентах создать натяг, то они будут поддерживать подвижную часть, заменяя опоры.

Крепление подвижной части на подвесе применяется в приборах наибольшей чувствительности – гальванометрах. Подвес, подобно растяжке, представляет собой тонкую упругую нить, на которой свободно подвешивается подвижная часть. В приборах на подвесах применяется световой отсчет. Они требуют стационарной установки по уровню, поскольку подвижная часть висит свободно, и поэтому даже небольшое отклонение положения прибора от вертикального может вызвать ее затирание.

Динамический момент, возникающий в приборе при движении подвижной части и стремящийся успокоить это движение, называется успокаивающим моментом.

Этот момент определяет важный эксплуатационный параметр прибора – время успокоения.

Хорошее успокоение в приборах достигается путем применения специальных устройств, называемых успокоителями. Конструкции ус-

покоителей бывают воздушные, магнитоиндукционные и жидкостные.

Воздушный успокоитель представляет собой дугообразный цилиндр, запаянный с одного конца. Внутри цилиндра находится поршень. Он жестко связан с подвижной частью прибора и не касается стенок цилиндра. Зазор между поршнем и цилиндром невелик, и при быстрых перемещениях поршня давление внутри цилиндра не успевает выровняться с атмосферным. В цилиндре создаются то сгущения, то разрежения воздуха, которые препятствуют движению поршня и тем самым быстро успокаивают систему. При медленном же движении поршня часть воздуха может свободно входить в цилиндр и выходить из него через зазор, не препятствуя поворотам подвижной части прибора.

Иногда воздушный успокоитель имеет форму замкнутой коробочки со щелью (рис. 1.6, *а*). Эта щель служит для перемещения рычага, на котором укреплена пластинка. Последняя не касается стенок коробочки и выполняет ту же роль, что и поршень. При движении пластинки в коробочке одновременно действуют и сгущения (по одну сторону пластинки) и разрежения (по другую сторону), препятствующие колебаниям.

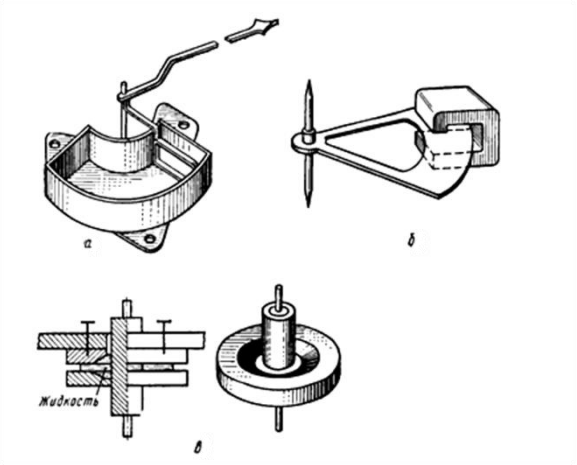


Рис. 1.6. Воздушный (*а*), магнитоиндукционный (*б*) и жидкостный (*в*) успокоители

Магнитоиндукционный успокоитель представляет собой перемещающуюся между полюсами постоянного магнита (рис. 1.6, *б*) легкую алюминиевую пластинку, жестко связанную с подвижной системой

прибора. При колебаниях пластинки в магнитном поле постоянного магнита в соответствии с законом Ленца в ней индуцируются токи, препятствующие этим колебаниям, поэтому колебания подвижной системы и стрелки быстро прекращаются.

Жидкостное успокоение (рис. 1.6, *в*) создается различными конструктивными способами, выбор которых определяется требуемой степенью успокоения, назначением и конструкцией измерительного механизма, условиями эксплуатации и другими причинами.

Следует отметить, что жидкостное успокоение обладает известными преимуществами перед другими способами успокоения. Например, оно оказывает тормозящее действие при движении подвижной части во всех направлениях, что используется для повышения виброустойчивости ряда приборов.

1.1.2. Электромагнитные измерительные механизмы

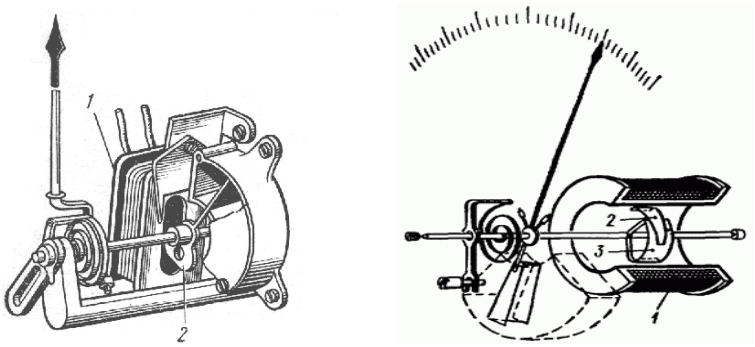
Электромагнитные измерительные приборы применяют для измерения *тока или напряжения в цепях переменного или постоянного тока*. Промышленность выпускает приборы данного типа в трех вариантах: с плоской и круглой катушкой, а также с магнитопроводом. Принцип действия приборов электромагнитной системы основан на взаимодействии магнитного поля катушки, создаваемого измеряемым током, со стальным сердечником, помещенным в это поле.

Механизм с плоской катушкой (рис. 1.7, *а*) представляет собой катушку, намотанную на каркас, имеющий щелевидное отверстие. Подвижная часть прибора содержит ось со стрелкой, несимметрично укрепленный сердечник и возвратную пружину. Для быстрого успокоения стрелки относительно положения равновесия служит успокоитель с воздушным торможением.

При включении прибора в сеть по катушке проходит ток и возникающее магнитное поле втягивает сердечник внутрь катушки. Сердечник укреплен на оси несимметрично, поэтому подвижная часть прибора поворачивается на некоторый угол. Подвижная часть будет поворачиваться до тех пор, пока вращающий момент, созданный током, не будет уравновешен противодействующим моментом спиральной пружины.

В механизме с круглой катушкой (рис. 1.7, *б*) внутри ее помещены два сердечника: подвижный, жестко укрепленный на оси прибора вместе со стрелкой, и неподвижный. Когда по катушке протекает ток, воз-

буждающий магнитное поле, концы сердечников намагничиваются с одинаковой полярностью и отталкивание их одноименных полюсов создает вращающий момент. Подвижный сердечник, отталкиваясь от неподвижного, поворачивает ось со стрелкой на некоторый угол. Для ослабления влияния внешних магнитных полей на катушку надет ферромагнитный экран. Прибор снабжен магнитным успокоителем.



а *б*

Рис. 1.7. Электромагнитный измерительный механизм:
а – с плоской катушкой: *1* – катушка; *2* – лепесток;
б – с круглой катушкой: *1* – катушка; *2, 3* – ферромагнитные элементы

Механизмы с круглой катушкой по сравнению с механизмами с плоской катушкой имеют некоторые преимущества в технологии изготовления и, кроме того, позволяют получить более равномерную шкалу. Однако они имеют и недостатки, главный из которых заключается в том, что в таких механизмах хуже используется внутренний объем, что вызывает увеличение собственного потребления прибора для данного значения вращающего момента.

Электромагнитный измерительный механизм с замкнутым магнитопроводом (рис. 1.8) состоит из катушки, помещенной на магнитопровод с полюсными наконечниками. При наличии тока в обмотке катушки подвижный сердечник стремится повернуться по часовой стрелке вокруг оси, втягиваясь в рабочее пространство между полюсными накладками левого полюса. Обычно в измерительных механизмах с замкнутым магнитопроводом применяют жидкостное успокоение.

Достоинствами измерительного механизма с замкнутым магнито-

проводом являются: повышение чувствительности, уменьшение погрешности от влияния внешних магнитных полей, возможность относительно просто менять характеры шкалы путем изменения положения левого полюсного наконечника относительно правого.

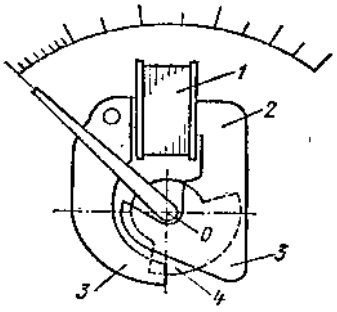


Рис. 1.8. Электромагнитный измерительный механизм
с замкнутым магнитопроводом:
1 – катушка; *2* – магнитопровод; *3* – полюсные наконечники;
4 – подвижный сердечник

Угол поворота подвижной части зависит от силы, с которой сердечник втягивается внутрь катушки (механизмы с плоской катушкой и замкнутым магнитопроводом) или с которой происходит отталкивание одноименно заряженных сердечников (механизм с круглой катушкой). Эта сила пропорциональна току и величине магнитной индукции B поля катушки:

$$F = kBI, \tag{1.1}$$

где k – коэффициент пропорциональности.

Так как при отсутствии насыщения магнитная индукция пропорциональна току, то угол поворота подвижной системы будет пропорционален квадрату тока. В этом случае шкала прибора должна быть квадратичной. Однако наличие в приборе ферромагнитного сердечника усложняет приводимую зависимость, вследствие чего шкала электромагнитных измерительных приборов неравномерна. Достоинством равномерной шкалы является постоянство масштаба вдоль всей шкалы, что обеспечивает простоту отсчета измеряемой величины в любой части шкалы.

Придавая сердечнику специальную форму и изменяя его располо-

жение относительно катушки, можно добиться некоторого уменьшения неравномерности шкалы в большей ее части, кроме начальных делений, которые остаются очень сильно сжатыми.

В электромагнитных вольтметрах катушки выполняют из большого числа витков (2000–10000) провода диаметром 0,08–0,1 мм. Катушки амперметров содержат небольшое число витков толстого медного провода круглого или ленточного сечения. Внешние магнитные поля оказывают значительное влияние на работу электромагнитного прибора, но благодаря ферромагнитному кожуху это влияние значительно ослабляется.

В электромагнитном приборе количество стали относительно мало, и большая часть пути магнитного потока проходит в воздухе. Поэтому измерительный механизм электромагнитной системы обладает малой чувствительностью, следовательно, затруднительно изготовить амперметр на малый ток (менее 0,5 А) или вольтметр на малое напряжение (менее 10 В).

Способность прибора работать в цепях переменного и постоянного тока объясняется тем, что изменение направления тока в катушке приводит к перемагничиванию сердечников, вследствие чего направление вращающего момента не меняется. При переменном токе прибор показывает действующие значения тока или напряжения. Мощность, потребляемая электромагнитными приборами от сети, колеблется от 2 до 8 Вт.

К *достоинствам электромагнитных приборов* следует отнести их простоту, дешевизну, надежность в эксплуатации, способность выдерживать кратковременные перегрузки, а также пригодность для измерений в цепях переменного и постоянного тока.

Недостатками приборов электромагнитной системы являются их сравнительно малая точность (класс точности 1; 1,5; 2,5), неравномерность шкалы, довольно большая потребляемая мощность, зависимость показаний от частоты тока и влияния внешних магнитных полей.

Чувствительность повышают путем применения растяжек и светового отсчета, а погрешности снижаются благодаря использованию специальных магнитных материалов для сердечников и эффективных способов защиты от влияния внешних магнитных полей.

1.1.3. Магнитоэлектрические измерительные механизмы

Приборы магнитоэлектрической системы применяют для измере-

ния *тока или напряжения в цепях постоянного тока*. Действие приборов магнитоэлектрической системы основано на взаимодействии магнитного поля постоянного магнита и магнитного поля проводника с током, выполненного в виде катушки.

Неподвижная часть прибора (рис. 1.9) состоит из постоянного магнита и стального цилиндра. Между полюсами магнита и стальным цилиндром имеется кольцевой воздушный зазор, в котором создается сильное и практически однородное магнитное поле. Подвижная часть прибора представляет собой катушку, выполненную тонким проводом на легкой алюминиевой рамке, свободно вращающейся (на двух полуосях) в кольцевом воздушном зазоре. К передней полуоси крепится стрелка с противовесами, предназначенными для уравновешивания подвижной системы прибора. Противодействующий момент создается с помощью двух спиральных пружин, через которые на рамку подводится электрический ток.

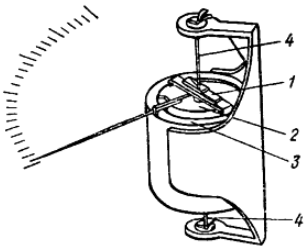


Рис. 1.9. Измерительный механизм магнитоэлектрической системы с внутрирамочным магнитом:
1 – подвижная катушка (рамка); *2* – внутрирамочный магнит; *3* – магнитомягкий магнитопровод; *4* – ленточные растяжки

При включении прибора по катушке проходит ток и возникает механическая сила, которая в соответствии с правилом левой руки поворачивает рамку на некоторый угол. Величина этой силы зависит от магнитной индукции B, силы тока в катушке I, числа витков w и активной длины проводника l:

$$F = 2BIlw. \qquad (1.2)$$

Так как магнитная индукция, активная длина и число витков (в каждом конкретном типе прибора) постоянны, угол поворота рамки будет определяться только силой тока, проходящего по катушке прибора,

и противодействующим моментом возвратных пружин. Вследствие этого приборы магнитоэлектрической системы имеют равномерную шкалу.

При повороте рамки в магнитном поле в ее витках индуктируется ЭДС, направление которой определяется правилом Ленца. Возникший под действием ЭДС ток вызывает появление противодействующей силы, способствующей быстрому успокоению подвижной системы прибора. Это устраняет необходимость применения успокоителя.

Приборы магнитоэлектрической системы полярны (т. е. имеют положительный и отрицательный зажимы), а в цепи переменного тока не дают показаний. При прохождении по катушке переменного тока вращающий момент с частотой тока меняет свое направление. Из-за инерции подвижная система не будет успевать колебаться с частотой тока, поэтому останется неподвижной.

Достоинства магнитоэлектрических приборов: высокая точность показаний, чувствительность, равномерная шкала, малое потребление энергии (10^{-4}–10^{-6} Вт), быстрое успокоение подвижной системы и малая чувствительность к внешним магнитным полям. Широко применяются в качестве вольтметров, миллиамперметров, микроамперметров, а также в универсальных измерительных приборах (авометрах).

К *недостаткам приборов магнитоэлектрической системы* относятся: сравнительно высокая стоимость, чувствительность к перегрузкам и пригодность для измерений только в цепях постоянного тока. Последний недостаток может быть устранен путем включения прибора через выпрямительное устройство, но в этом случае прибор будет относиться уже к выпрямительной системе.

1.1.4. Электродинамические измерительные механизмы

Приборы электродинамической системы применяют для измерения *напряжения, тока или мощности в цепях переменного и постоянного тока*. Действие электродинамических приборов основано на взаимодействии магнитных полей неподвижной и подвижной катушек с токами.

Прибор (рис. 1.10) имеет неподвижную катушку, которая содержит небольшое число витков толстой проволоки, и подвижную катушку с большим числом витков тонкой проволоки, размещенную внутри неподвижной. На оси подвижной катушки укреплены стрелка и пружины, предназначенные для подведения тока и создания противодейст-

вующего момента. Нижний конец стрелки оканчивается поршнем воздушного успокоителя. В связи с чувствительностью прибора к внешним магнитным полям применение магнитного успокоителя в данной системе недопустимо.

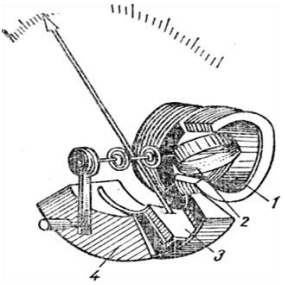


Рис. 1.10. Электродинамический измерительный механизм:
1 – неподвижная катушка; *2* – подвижная катушка;
3 – поршень; *4* – воздушный успокоитель

При включении прибора в цепь по катушкам проходит ток и возникающие магнитные поля вызывают появление электродинамической силы, которая стремится повернуть подвижную систему так, чтобы магнитные поля обеих катушек совпадали по направлению. Если допустить, что по катушкам прибора проходят одинаковые токи, то сила взаимодействия катушек (и вращающий момент) будет пропорциональна квадрату силы тока:

$$F = kI^2. \qquad (1.3)$$

Поэтому электродинамические амперметры имеют неравномерную шкалу.

При включении прибора в сеть переменного тока направление вращающего момента не изменится, так как направление тока изменяется одновременно в обеих катушках. В цепях переменного тока приборы данной системы показывают действующие значения измеряемой величины.

В случае использования прибора для измерения напряжения подвижную и неподвижную катушки соединяют последовательно. Такое же соединение применяют при измерении небольших токов (до 0,5 А). При измерении токов большей величины катушки прибора соединяют

параллельно.

Когда измеряют мощность, неподвижную катушку включают последовательно, а подвижную – параллельно. В последнем случае через неподвижную катушку будет проходить ток нагрузки, а через подвижную – ток, пропорциональный напряжению на нагрузке, что вызовет возникновение вращающего момента, пропорционального мощности, потребляемой нагрузкой ($P = UI$). По этой причине электродинамические ваттметры имеют равномерную шкалу.

Достоинства электродинамических приборов – пригодность для измерения в цепях переменного и постоянного тока, возможность использования для измерения напряжения, силы тока или мощности, высокая точность, равномерность шкалы (у ваттметров).

Недостатки – сравнительно большое потребление мощности (при измерении токов и напряжений), чувствительность к внешним магнитным полям и перегрузкам, сложная конструкция и высокая стоимость, чувствительность к механическим воздействиям – ударам, тряске и вибрации.

Следует отметить, что чем меньше потребление мощности электродинамического прибора, тем слабее собственные магнитные поля и сильнее влияние внешних полей. Для уменьшения их влияния применяют стальной сердечник. Электродинамические приборы со стальным сердечником называются ферродинамическими.

Однако с применением стали уменьшается точность прибора вследствие влияния гистерезиса и вихревых токов. Поэтому приборы ферродинамической системы для точных измерений не пригодны. Они используются в основном в качестве регистрирующих приборов и щитовых ваттметров.

1.1.5. Электростатические измерительные механизмы

Приборы электростатической системы предназначаются *для измерения напряжения в цепях постоянного и переменного тока*. В приборах этой системы вращающий момент возникает в результате взаимодействия двух систем заряженных проводников, одна из которых является подвижной. Отклонение подвижной части связано с изменением емкости, которое, в свою очередь, связано с изменением активной площади пластин.

Неподвижная часть измерительного механизма (рис. 1.11) состоит

из одной или нескольких камер, что напрямую связано с чувствительностью прибора. Каждая камера представляет собой две металлические пластины с воздушным зазором между ними. В эти зазоры свободно входят тонкие алюминиевые пластины подвижной части.

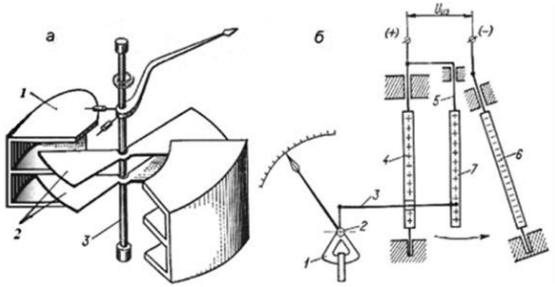


Рис. 1.11. Электростатический измерительный механизм:
а – с изменяющейся активной площадью электродов: *1* – неподвижные пластины; *2* – подвижные пластины; *3* – ось; *б* – с изменением расстояния между электродами: *1* – магнитоиндукционный успокоитель; *2* – ось; *3* – тяга; *4, 6* – неподвижная пластина; *5* – металлическая ленточка; *7* – подвижная пластина

Если к подвижным и неподвижным пластинам подвести измеряемое напряжение, то они окажутся заряженными противоположными по знаку зарядами, в результате чего под действием электростатических сил притяжения подвижные пластины будут стремиться войти внутрь камер. Поворот подвижных пластин, жестко укрепленных на оси, вызовет закручивание упругих элементов, создающих противодействующий момент. При равенстве вращающего и противодействующего моментов подвижная часть остановится, и по положению указателя на шкале можно будет определить измеряемое напряжение. При изменении полярности напряжения направление отклонения подвижной части не изменяется. Для успокоения подвижной части применяется магнитоиндукционный механизм.

Для того чтобы шкала прибора была равномерной, выбирают соответствующим образом форму подвижных и неподвижных пластин, т. е. задаются определенным законом изменения емкости с изменением угла поворота.

Достоинства приборов электростатической системы – независимость показаний от частоты, температуры и посторонних магнитных полей. При применении в цепях постоянного тока энергопотребление

равно нулю.

Недостатки – зависимость показаний от действия электрических полей.

1.1.6. Индукционные измерительные механизмы

Индукционные приборы в настоящее время служат *для измерения расхода электрической энергии в цепях переменного тока*. Действие индукционного счетчика основано на взаимодействии вихревых токов с вращающимся магнитным полем.

Основными деталями индукционного счетчика (рис. 1.12) являются два электромагнита, подвижный алюминиевый диск, редуктор, счетный механизм и тормозной магнит.

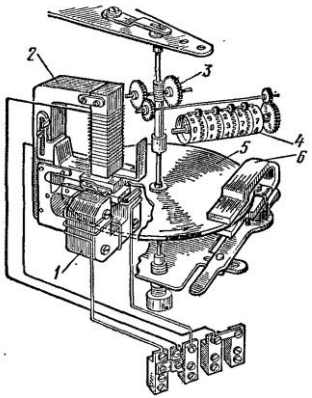


Рис. 1.12. Счетчик электрической энергии:
1 и *2* – электромагниты; *3* – редуктор;
4 – счетный механизм; *5* – диск; *6* – тормозной магнит

Один электромагнит имеет небольшое число витков толстого провода и включается с нагрузкой последовательно (токовая обмотка), а второй – состоит из большого числа витков тонкого провода и включается параллельно (обмотка напряжения). Токовая обмотка намотана на подковообразный сердечник, причем навивка идет встречно друг другу. Это обеспечивает создание между полюсами электромагнитов вращающегося магнитного поля, в котором размещен свободно вращающийся алюминиевый диск.

Вращающееся магнитное поле, пересекая край алюминиевого диска, индуктирует в нем вихревые токи. В результате взаимодействия магнитных полей вихревых токов с вращающимся магнитным полем возникает механическая сила, которая приводит диск во вращение.

Сила взаимодействия между вихревыми токами и вращающимся магнитным полем пропорциональна произведению мгновенных значений тока и напряжения, т. е. мощности токоприемников:

$$M_{вр} = kUI = M_{вр} = kP, \quad (1.4)$$

где k – постоянный коэффициент.

Чтобы скорость вращения диска была пропорциональна мощности токоприемников, применен тормозной магнит.

В диске при вращении его между полюсами тормозного магнита индуктируются вихревые токи, которые, взаимодействуя с магнитным полем магнита, создают противодействующий момент, пропорциональный частоте вращения диска. Чем быстрее вращается диск, тем больше сила его торможения. Частота вращения диска становится постоянной, когда вращающий момент уравновешивается тормозящим моментом.

Счетный механизм прибора измеряет число оборотов диска, т. е. величину, пропорциональную энергии, расходуемой на работу токоприемника.

Вращение диска счетчика без подключения нагрузки называется *самоходом*. Самоход может быть вызван увеличением напряжения сети, стальным компенсационным винтом постоянного магнита или вибрацией щита, на котором укреплен счетчик. Устранение самохода заключается в регулировке расстояния между пластинкой, закрепленной на полюсе обмотки напряжения, и пластинкой, закрепленной на оси алюминиевого диска. Так как электромагнит напряжения постоянно находится в работе, полюсная пластинка намагничивается и притягивает к себе пластинку на оси, в результате чего создается тормозное усилие, и диск прекращает вращаться.

Постоянная счетчика – энергия, измеряемая счетчиком за время одного оборота диска, Вт/об.

1.1.7. Приборы вибрационной системы

Приборы вибрационной системы предназначены *для измерения частоты переменного тока*. Действие вибрационных приборов осно-

вано на использовании явлений электромагнетизма и механического резонанса.

Каждая механическая система, способная совершать колебательные движения, обладает определенной частотой собственных колебаний, которая обусловливается массой в упругостью системы. При резонансе, т. е. при совпадении частот собственных колебаний системы и колебаний внешнего источника, амплитуда колебаний данной механической системы резко увеличивается. Это свойство используется в измерительных приборах вибрационной системы.

Вибрационный частотомер (рис. 1.13) состоит из электромагнита, стального якоря, укрепленного на бруске, и нескольких вибраторов с различной длиной или массой. Концы вибраторов отогнуты под прямым углом, окрашены белой краской и размещены в горизонтальной щели на шкале частотомера. Брусок крепится к пластинчатым прижимам, что обеспечивает некоторую подвижность механической системы.

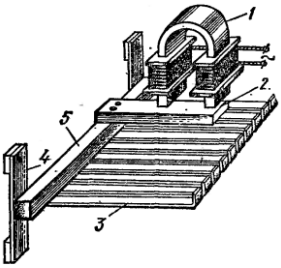


Рис. 1.13. Устройство частотомера вибрационной системы:
1 – электромагнит; *2* – якорь; *3* – вибраторы;
4 – пластинчатые прижимы; *5* – брусок

Если по обмотке электромагнита пропустить переменный ток, то якорь будет сильнее притягиваться к полюсам в те моменты, когда ток имеет наибольшее значение, т. е. два раза за период. Колебания якоря передаются вибраторам. С наибольшей амплитудой будет колебаться вибратор, собственная частота колебаний которого совпадает с частотой колебаний якоря. Цифра на шкале, стоящая против вибратора, колеблющегося с наибольшей амплитудой, укажет частоту тока в сети.

Большинство частотомеров вибрационной системы предназначены для измерения частот 45–55 Гц. Однако встречаются частотомеры, рассчитанные для измерения более высоких частот (до 1550–1650 Гц).

Достоинство приборов вибрационной системы – независимость показаний от напряжения сети.

Недостатки – зависимость показаний от механических вибраций, невозможность измерения высоких частот и прерывность шкалы, вследствие чего затрудняются измерения на промежуточных частотах, когда одновременно колеблется несколько вибраторов.

1.1.8. Приборы термоэлектрической системы

Термоэлектрический прибор – это совокупность термопары с подогревателем и магнитоэлектрического измерителя (индикатора). Такие приборы предназначены для измерения слабых переменных токов. Измеряемый ток проходит через подогреватель *П* (рис. 1.14) и нагревает его. К подогревателю прикреплен или находится вблизи него спай термопары *Т*. Электродвижущая сила термопары создает ток, проходящий через магнитоэлектрический измеритель *И* (прибор). Таким образом, показания термоэлектрического прибора пропорциональны мощности, расходуемой на нагревание подогревателя (т. е. действующему значению квадрата тока в нем). Следовательно, шкала такого прибора почти квадратична.

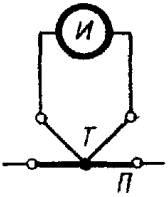


Рис. 1.14. Схема прибора
термоэлектрической системы

В наиболее точных приборах (до 100–150 мА) для ограничения потерь тепла подогреватель вместе с термопарой помещают в вакуумный стеклянный баллон. Это значительно повышает чувствительность термоэлемента.

1.1.9. Цифровые приборы

Цифровыми называются электроизмерительные приборы, преобразующие определяемую аналоговую величину в кодированный сигнал и

представляющие результаты измерения в виде цифрового значения на отсчетном устройстве.

В соответствии с определением цифровые измерительные приборы (ЦИП) состоят из аналого-цифровых преобразователей (АЦП) и цифровых отсчетных устройств (ЦОУ). Результаты преобразования АЦП в виде кода могут подаваться на регистрирующие или вычислительные приборы.

В основе цифровых электрических измерений заложено аналого-цифровое преобразование (кодирование), которое заключается в присвоении дискретного значения (кода) искомой величине с определенным шагом по времени.

В цифровом приборе, служащем для измерения, непрерывно изменяющаяся измеряемая величина преобразуется в дискретную (прерывную) величину в виде числа, которое изображается на его отсчетном устройстве.

Цифровые приборы предназначены для измерения различных электрических величин: тока, напряжения и др. Так, например, цифровой мультиметр (рис. 1.15 и 1.16) может быть использован для измерения переменного и постоянного напряжения, постоянного тока, сопротивления, проверки диодов и измерения транзисторов. Время одного измерения не превышает нескольких миллисекунд.

Рис. 1.15. Цифровой мультиметр

Недорогие мультиметры можно применять только для измерений, производимых при наладке оборудования и поиске неисправностей.

Их нельзя использовать при калибровке и уж тем более при поверке датчиков и другого оборудования, так как точность измерения данных мультиметров недостаточна для этих целей и, кроме того, они не внесены в государственный реестр средств измерения. При поверке и калибровке оборудования следует использовать более точные мультиметры, например, приборы серии В7 или импортные мультиметры APPA, Fluke и аналогичные.

Рис. 1.16. Гнезда для подключения щупов

Нужно всегда следить за степенью разряда батареи ЦИМ, так как в случае сильного разряда батареи погрешность измерения прибора резко возрастает. Предпочтение отдается тем моделям, у которых есть индикатор разряда батареи. Замену батарей нужно производить сразу, как только загорится индикатор разряда батареи.

Цифровые приборы в сочетании с вычислительными машинами используются для автоматического контроля управления производственными процессами.

Основными достоинствами цифровых приборов являются:

- возможность их сочетания с другими устройствами;
- отсутствие возможности неправильной трактовки результатов измерения;
- возможность автоматизации процесса измерения;
- высокое быстродействие цифровых измерений;
- возможность передачи кодированных сигналов на расстояние.

К основным недостаткам ЦИП следует отнести сложность устройства и, как следствие, относительно невысокую надежность приборов и сравнительно высокую стоимость.

1.2. ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ

1.2.1. Измерение силы тока и напряжения

Для измерения силы тока и напряжения используют измерительные приборы различных систем – амперметры и вольтметры, условное обозначение и схемы включения которых показаны на рис. 1.17.

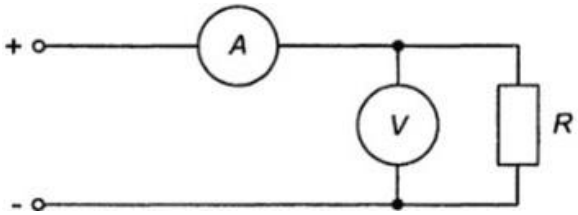


Рис. 1.17. Схема включения амперметра и вольтметра

Для измерения малых значений тока применяют гальванометры, микроамперметры, миллиамперметры, а для измерения очень низких напряжений – милливольтметры, микровольтметры.

Включение амперметра последовательно с нагрузкой не должно влиять на измеряемый ток в цепи, поэтому сопротивление его должно быть малым по сравнению с сопротивлением приемника энергии. При малом сопротивлении амперметра $R_а$ мала мощность, потребляемая им:

$$P_а = I_а^2 R_а. \qquad (1.5)$$

Включение вольтметра не должно влиять на измеряемое напряжение, поэтому сопротивление вольтметра должно быть бóльшим по сравнению с сопротивлением приемника, параллельно которому он включен. При большом сопротивлении вольтметра $R_в$ мал ток $I_в$ в нем и мала мощность потребляемая им:

$$P_в = I_в^2 R_в. \qquad (1.6)$$

Для измерения токов и напряжений, превышающих верхний предел измерения прибора, применяют при постоянном токе *шунты и добавочные сопротивления*, а при переменном токе – *измерительные трансформаторы тока и напряжения*.

Если амперметром, рассчитанным на измерение сравнительно не-

большой силы тока, требуется измерить значительно большую величину, то параллельно амперметру подключают шунт $R_{ш}$. В действительности шунт включают последовательно с нагрузкой, а амперметр подключают к шунту (рис. 1.18).

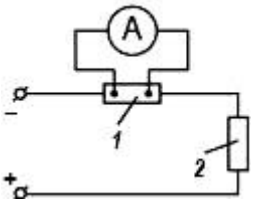


Рис. 1.18. Схема включения амперметра с шунтом:
1 – шунт; *2* – нагрузка

Шунт представляет собой толстую константановую или манганиновую пластину. Применение в качестве шунтов (и добавочных резисторов) манганина и константана объясняется тем, что сопротивление этих металлов в незначительной степени зависит от температуры. Если сопротивление шунта в 9 раз меньше сопротивления обмотки амперметра, то 0,9 тока пройдет через шунт и только 0,1 – через прибор. При этом пределы измерений прибора расширяются в 10 раз. Сопротивление шунта определяют по формуле

$$R_{ш} = \frac{R_{а}}{n-1}, \qquad (1.7)$$

где $R_{ш}$ – сопротивление шунта;

$R_{а}$ – сопротивление обмотки амперметра;

n – число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерения прибора.

После подключения шунта на шкале прибора следует поставить множитель (в данном случае ×10). При включении амперметра с шунтом фактический ток в цепи определяется произведением показаний прибора на множитель.

Шунт должен иметь четыре контакта: к двум из них подключают прибор, а к двум другим – соединительные провода электрической цепи. Такое подсоединение исключает зависимость показаний прибора от переходных сопротивлений контактов.

Выбор сопротивления шунта зависит от внутреннего сопротивле-

ния прибора. Так, например, при расширении пределов измерений щитовых приборов, рассчитанных на десятки и сотни ампер, сопротивление шунтов может составлять тысячные или даже миллионные доли Ома.

В тех случаях, когда вольтметром, рассчитанным на измерение небольших напряжений, требуется измерить большую величину, последовательно с вольтметром включают добавочный резистор $R_д$ (рис. 1.19).

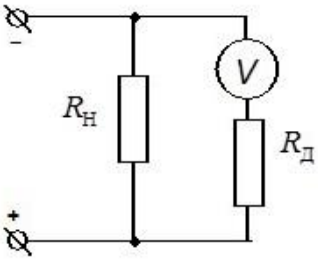


Рис. 1.19. Схема включения вольтметра
с добавочным сопротивлением

Если добавочное сопротивление $R_д$ будет в 9 раз больше сопротивления обмотки вольтметра, то 0,9 общего напряжения будет приходиться на добавочное сопротивление $R_д$ и только 0,1 – на сопротивление обмотки вольтметра $R_в$. При этом пределы измерений прибора расширятся в 10 раз.

Расчет сопротивления добавочного резистора производят по формуле

$$R_д = \frac{R_в}{n-1}, \qquad (1.8)$$

где $R_д$ – сопротивление добавочного резистора;

$R_в$ – сопротивление обмотки вольтметра;

n – число, показывающее, во сколько раз расширяются пределы измерений прибора.

Очевидно, что после включения добавочного резистора необходимо изготовить новую шкалу или на имеющейся шкале поставить соответствующий множитель. Так как сопротивление добавочных резисторов в щитовых приборах может достигать нескольких тысяч Ом, их выполняют в виде катушек из тонкого провода с большим удельным

сопротивлением.

Шунты и добавочные резисторы можно монтировать как внутри прибора, так и подключать к его зажимам на время измерений. В последнем случае на шкале прибора указывают: «С отдельным шунтом» или «С отдельным добавочным резистором».

1.2.2. Измерение мощности и энергии

Для измерения мощности в цепи постоянного тока не требуется специального прибора, так как мощность $P = UI$ легко может быть подсчитана по показаниям вольтметра и амперметра.

В цепи переменного тока мощность зависит не только от напряжения и тока, но и от сдвига фаз между ними:

$$P = UI\cos\varphi. \qquad (1.9)$$

Поэтому произведение напряжения и тока не определяет мощности, так как для ее измерения необходим ваттметр электродинамической или ферродинамической системы. В электродинамическом ваттметре неподвижная катушка включается последовательно с нагрузкой $R_н$, а подвижная снабжается добавочным сопротивлением $R_д$ и включается параллельно нагрузке (рис. 1.20).

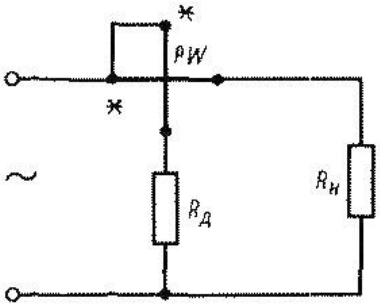


Рис. 1.20. Схема включения ваттметра

Таким образом, мгновенное значение тока неподвижной катушки равно току нагрузки, а ток подвижной катушки пропорционален напряжению на зажимах приемника и должен совпадать с напряжением по фазе. Чтобы ток совпадал по фазе с напряжением, добавочное ак-

тивное сопротивление $R_д$ должно быть много больше индуктивного сопротивления самой обмотки, что дает возможность считать сопротивление цепи напряжения безреактивным.

Вращающий момент у электродинамического ваттметра пропорционален произведению напряжения и тока. При включении ваттметра в цепь переменного тока на вращающий момент не влияет одновременное изменение направления тока в обеих катушках, но если поменять местами зажимы одной из двух катушек ваттметра, то это изменит фазу тока в этой катушке на 180° и направление вращающего момента. Для предупреждения возможности неправильного включения ваттметра относительные «начала» двух катушек ваттметра (генераторные зажимы), присоединенные к одному и тому же полюсу источника, отмечаются у зажимов звездочкой (*); концы этих катушек присоединяются к разным полюсам нагрузки.

Электродинамические ваттметры используются как в цепях переменного, так и постоянного тока.

Ферродинамические ваттметры обладают меньшей точностью и в цепях постоянного тока непригодны из-за влияния гистерезиса.

Для измерения расхода электрической энергии переменного тока применяют счетчики индукционной системы. Схема включения в сеть подобна схеме включения ваттметра, т. е. одна обмотка счетчика включается последовательно с нагрузкой, а вторая – параллельно ей (рис. 1.21).

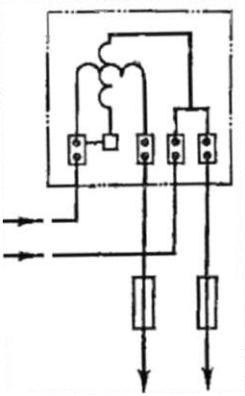


Рис. 1.21. Схема включения счетчика

В отличие от ваттметров в цепи параллельной обмотки никаких добавочных сопротивлений нет, так как для создания вращающего магнитного поля токи в двух катушках должны быть сдвинуты фазе на угол, близкий к 90^{o}.

На таблице счетчика указано напряжение, ток, частота, на которые он рассчитан, в каких единицах измеряют энергию, какому количеству оборотов диска соответствует расход энергии в 1 кВт·ч.

1.2.3. Измерение сопротивлений

Для измерения сопротивления может быть использован метод амперметра и вольтметра. Используя показания приборов, включенных с измеряемым резистором, имеем:

$$R_x = \frac{U}{I}. \qquad (1.10)$$

Для большей точности при измерении малых сопротивлений приборы следует включать так, чтобы сопротивление амперметра не влияло на показания вольтметра (рис. 1.22, *а*), а при измерении больших сопротивлений – так, чтобы сопротивление вольтметра не влияло на показания амперметра (рис. 1.22, *б*). Для ограничения силы тока включается добавочное сопротивление $R_д$.

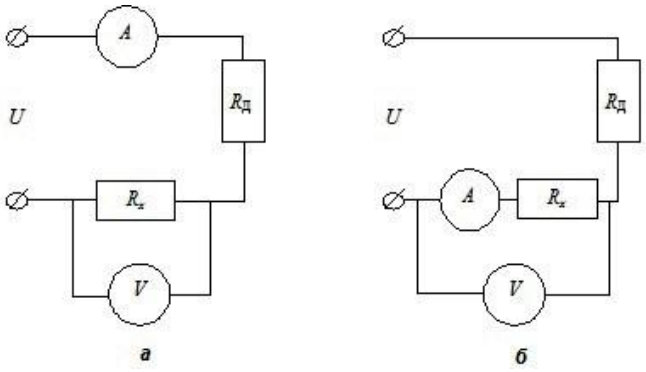


Рис. 1.22. Схема включения амперметра и вольтметра при измерении сопротивлений: *а* – малой величины; *б* – большой величины

Для непосредственного измерения сопротивлений служат приборы

омметры и мегомметры, которые могут включаться в схему последовательно или параллельно.

Более точным методом измерения сопротивления и других электрических величин (индуктивностей, емкостей) является мостовая схема. Мост для измерения сопротивления состоит из трех плеч с регулируемыми сопротивлениями, которые вместе с четвертым измеряемым сопротивлением образуют замкнутый контур. При измерении малых сопротивлений большую погрешность вносят сопротивления контактов и соединительных проводов. В таких случаях используют более сложные схемы (двойные мосты).

1.2.4. Измерение неэлектрических величин

Широко применяется измерение неэлектрических величин электрическими методами, так как с их помощью получают измерение дистанционное, непрерывное, высокой точности и чувствительности.

Для проведения измерений неэлектрическую величину необходимо преобразовать в зависящую от нее электрическую величину, определяемую показаниями электроизмерительного прибора. Такое преобразование выполняется первичным измерительным преобразователем (датчиком). Датчики бывают:

– параметрические – преобразовывают неэлектрическую величину в один из параметров электрической цепи (сопротивление, индуктивность, емкость);

– генераторные – преобразовывают неэлектрическую величину в ЭДС.

Устройства для измерения неэлектрических величин принципиально должны содержать преобразователь, соединительные провода и электроизмерительный прибор, шкала которого проградуирована в значениях измеряемой величины. В действительности эти устройства значительно сложнее, так как они содержат еще источники питания, стабилизаторы, выпрямители, усилители и т. д.

1.2.5. Проведение измерений

В зависимости от способа получения результата измерения делятся на прямые и косвенные.

Прямое измерение – это определение значения измеряемой величи-

ны непосредственно с помощью средств измерения. Так, можно измерить силу тока амперметром и др.

При косвенных измерениях значение физической величины определяется по формуле, связывающей ее с другими величинами, полученными в ходе прямых измерений. Например, так измеряется сопротивление по силе тока и напряжению и т. д.

Для определения показаний электроизмерительных приборов необходимо научиться правильно определять у них такие параметры, как предел измерения и цена деления.

Предел измерения – это наибольшее значение измеряемой величины, которая может быть измерена прибором.

Цена деления – это численное значение измеряемой величины, соответствующее одному делению шкалы.

В зависимости от этих параметров приборы могут быть с именованной шкалой и многопредельные.

У многопредельных приборов имеются переключатели пределов, вид и форма которых отличаются в зависимости от конструкции и марки прибора (рис. 1.23).

Рис. 1.23. Многопредельные приборы

У приборов с именованной шкалой предел измерения определяется по самому большому числу на шкале возле крайнего деления, а цена деления – как отношение разности между соседними числами шкалы к числу делений между ними.

У многопредельных приборов предел измерения определяется по положению переключателя пределов или по надписям возле зажимов, с помощью которых подключается прибор. Общий зажим отмечается звездочкой (*) или знаком минус (–), если прибор предназначен для включения в цепи постоянного тока. Цена деления таких приборов определяется как отношение предела измерения к максимальному значению на шкале прибора.

У многопредельных ваттметров имеются отдельные переключатели пределов измерения по напряжению и току (рис. 1.24).

Рис. 1.24. Многопредельный ваттметр

Предел измерения таких ваттметров по мощности рассчитывается по формуле

$$P_н = U_н I_н \cos \varphi_н, \qquad (1.11)$$

где $P_н$ – предел измерения ваттметра по мощности, Вт;

$U_н$, $I_н$ – пределы измерения по напряжению и току, которые определяются по положениям соответствующих переключателей или надписям возле зажимов.

Одним из видов многопредельных приборов является комплект измерительный К505 (рис. 1.25).

Имеющаяся на нем таблица значений (рис. 1.26) позволяет определить цену деления каждого прибора без дополнительных вычислений.

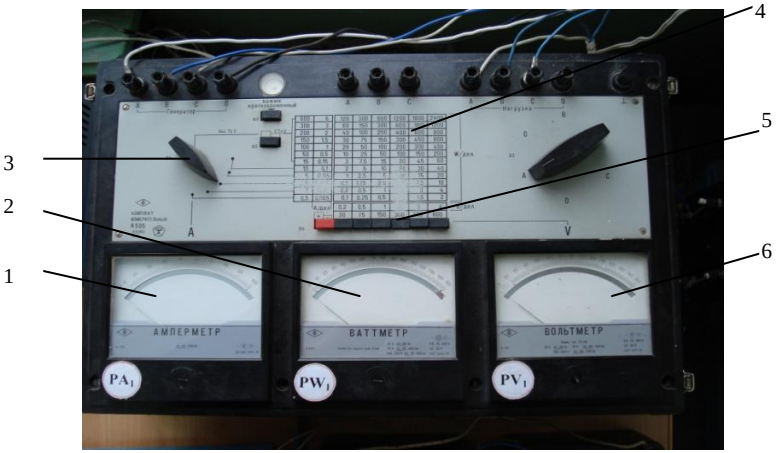


Рис. 1.25. Комплект измерительный К505:
1 – амперметр; *2* – ваттметр; *3* – переключатель пределов по току; *4* – таблица значений; *5* – переключатели пределов по напряжению; *6* – вольтметр

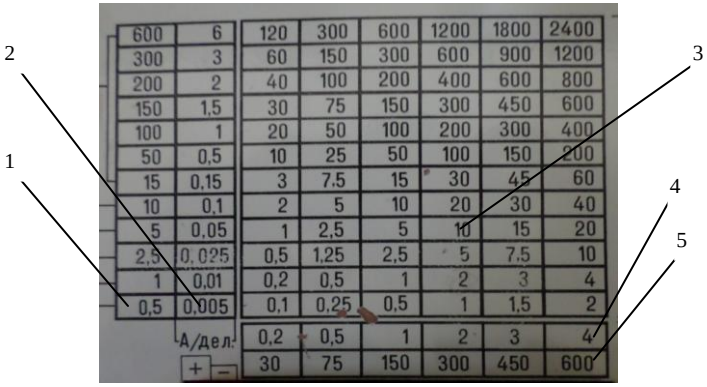


Рис. 1.26. Таблица значений прибора К505:
1 – столбец пределов по току; *2* – столбец цены деления амперметра; *3* – значения цены деления ваттметра; *4* – строка цены деления вольтметра;
5 – строка пределов по напряжению

Например, если предел измерения по току составляет 5 А, то цена деления амперметра – 0,05 А, а если предел измерения по напряжению составляет 300 В, то цена деления вольтметра – 2 В. Цена деления

ваттметра определяется на пересечении соответствующих строки и столбца значений, указанных амперметром и вольтметром. В нашем случае на пересечении строки с пределом по току 5 А со столбцом с пределом по напряжению 300 В получаем значение цены деления ваттметра 10 Вт.

Электроизмерительные устройства могут эксплуатироваться с устройствами, расширяющими их пределы измерения (дополнительные резисторы, трансформаторы напряжения и тока). В этом случае цена деления должна рассчитываться с учетом этих устройств.

В связи с тем, что абсолютно точных приборов нет, показания приборов несколько отличаются от действительного значения измеряемой величины. Разность между показанием прибора и действительным значением измеряемой величины называется *абсолютной погрешностью.*

Отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины называется *относительной погрешностью* прибора:

$$\gamma_{от} = (\Delta A / A)\ 100\ \%. \qquad (1.12)$$

Отсюда следует, что относительная погрешность в начале шкалы прибора больше, чем в конце. Это обстоятельство необходимо учитывать при выборе предела измерений в универсальных измерительных приборах (авометрах). Наименьшая погрешность в измерениях будет при использовании последней трети шкалы прибора.

Таким образом, точность стрелочных измерительных приборов (самых распространенных) оценивать по их относительной погрешности неудобно, так как абсолютная погрешность у них примерно одинакова вдоль всей шкалы и, следовательно, с уменьшением измеряемой величины быстро растет относительная погрешность. Для оценки точности стрелочных измерительных приборов служит их приведенная погрешность, равная отношению абсолютной погрешности показания ΔA к значению, соответствующему наибольшему (номинальному) показанию прибора $A_н$, выраженному в процентах, т. е.

$$\gamma_{пр} = (\Delta A / A_н)\ 100\ \%. \qquad (1.13)$$

Приведенная погрешность при нормальных эксплуатационных условиях (температура +20 °С, правильная установка, отсутствие внешних магнитных полей и больших ферромагнитных масс) называется *основной погрешностью* прибора.

Кроме погрешности, важной характеристикой средств измерений

является их чувствительность. Чувствительность прибора к измеряемой величине – это отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины. Величина, обратная чувствительности, называется *постоянной прибора* или *ценой деления*.

От чувствительности необходимо отличать понятие *порога чувствительности* измерительного прибора, под которым понимают наименьшее изменение значения измеряемой величины, вызывающее заметное изменение показаний прибора.

Потребляемая мощность – это мощность, потребляемая электроизмерительным прибором при включении его в измерительную цепь. В большинстве случаев эта мощность мала с точки зрения экономии электроэнергии. Но при измерении в маломощных цепях потребление приборами мощности может изменить режим работы цепи, что приводит к погрешностям измерений. Поэтому малое потребление мощности от цепи, в которой осуществляется измерение, является достоинством прибора. Мощность, потребляемая приборами, в зависимости от принципа действия, назначения прибора и предела измерения, имеет самые различные значения и для большинства приборов находится в пределах 10^{-12} – 15 Вт.

Быстродействие – число измерений, выполняемых в единицу времени.

Время установления показаний (*время успокоения*) – это промежуток времени с момента изменения измеряемой величины до момента, когда указатель займет положение, соответствующее новому значению измеряемой величины. Обычно этот интервал рассматривают до момента, когда отклонение указателя от установившегося значения не превышает 1% длины шкалы. Время установления показаний для большинства типов приборов не должно превышать 4 с.

Диапазон измерения – область значений между верхним и нижним пределами измерений. Диапазон измерений может состоять из нескольких частей (поддиапазонов) с разными классами точности.

Перегрузочная способность – это возможность прибора сохранять работоспособность при кратковременном повышении токов или напряжений сверх установленных величин.

1.3. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Записать название и цель лабораторной работы.
2. Привести характеристику объектов и средств исследования по

форме табл. 1.5.

Т а б л и ц а 1.5. **Характеристика измерительных приборов**

Показатели	Прибор
Наименование прибора и его условное обозначение	Вольтметр (V)
Род тока	⎓ (постоянный или переменный)
Класс точности	0,5 (лабораторный)
Форма корпуса	Прямоугольная
Положение шкалы при измерении	⌐¬ (горизонтальное)
Эксплуатационная группа	А (0 – (+35) °С)
Система прибора	Электромагнитная
Год выпуска	1963
Испытательное напряжение изоляции	2000 В
Марка прибора	Э59
Предел измерения	75 В, 150 В, 300 В, 600 В
Цена деления прибора	0,5 В, 1 В, 2 В, 4 В
Вид отсчетного устройства	Ножевидная стрелка
Заводской номер	52070

П р и м е ч а н и е. Пример оформления таблицы представлен для прибора, показанного на рис. 1.1.

Лабораторная работа № 2.
ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цели работы: 1. Изучить основные соотношения между физическими величинами (токи, электродвижущие силы, напряжения, сопротивления) в неразветвленной цепи постоянного тока с одним источником питания и в разветвленной цепи с двумя источниками питания.

2. Экспериментально определить внутреннее сопротивление и электродвижущую силу источников питания.

3. Экспериментально определить напряжение между двумя узлами неразветвленной цепи и токи в ее ветвях, сравнить эти величины с их расчетными значениями.

4. Получить внешнюю характеристику источника питания.

2.1. ОБЪЕКТЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, состоя-

щая из двух стандартных источников постоянного тока типа 13УН-1, блока нагрузочных реостатов типа РПШ-5 и измерительных приборов.

Источник постоянного тока типа 13УН-1 (рис. 2.1) состоит из одного блока, на лицевой панели которого расположены органы управления и контроля, клеммы и гнезда для подсоединения различных приемников. Напряжение питания на блок подается включением однополюсного выключателя *QF*1. В первичной цепи блока установлен автотрансформатор *TV*1 типа ЛАТР-2М на номинальный ток $I_н$ = 2,5 А, напряжение $U_н$ = 220 В, частоту $f_н$ = 50 Гц. В зависимости от положения ручки автотрансформатора на первичную обмотку силового понижающего трансформатора *TV*2 может подаваться напряжение от 0 до 250 В, которое контролируется вольтметром *PV*1.

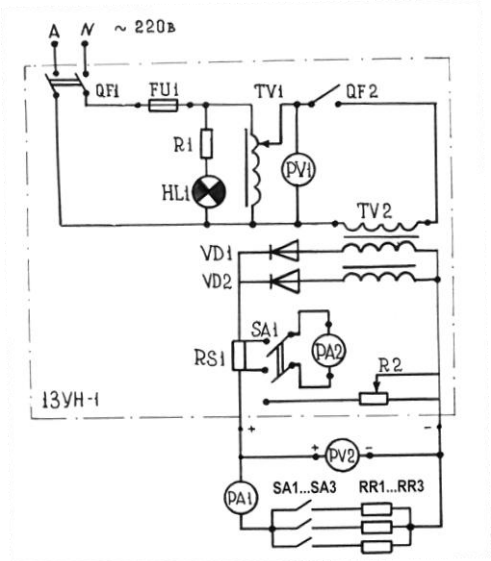


Рис. 2.1. Принципиальная электрическая схема источника постоянного тока типа 13УН-1

Измерение силы постоянного тока и напряжения производится с помощью амперметра *PA*2 с переключателем *SA*1 на три положения. В нейтральном положении переключателя прибор *PA*2 используется как милливольтметр.

В качестве нагрузки использован блок реостатов *RR*1...*RR*3 типа

РПШ-1, номинальный ток каждого их них $I_н$ = 5 А, сопротивление $R_н$ = 15 Ом. С помощью однополюсных выключателей *SA*2…*SA*4 реостатами можно изменять ток нагрузки источников постоянного тока.

Для измерения тока нагрузки служит амперметр магнитоэлектрической системы *PA*1 типа М1104 с током $I_н$ = 0–30 А, для измерения напряжения нагрузки – вольтметр магнитоэлектрической системы *PV*2 типа М45М на номинальное напряжение $U_н$ = 3–300 В.

2.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЦЕПЯХ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Электрической цепью постоянного тока называют замкнутый путь, по которому переносятся электрические заряды, состоящий из источника энергии (например, аккумулятора), приемника энергии (например, электрической лампы) и двух соединяющих их проводов. По одному из проводов заряды идут от источника к токоприемнику, а по другому возвращаются от токоприемника к источнику. Скорость распространения электрической энергии в цепи около 300 тыс. км/с.

Электрическая энергия вырабатывается за счет химической, механической и других видов энергии. На положительном и отрицательном полюсах источника энергии получаются различные уровни электрических зарядов, которые стремятся выровняться через электрическую цепь, подобно тому, как стремятся выровняться уровни воды в различных сосудах, соединенных между собой трубкой. С некоторым упрощением силу, с которой заряды стремятся к выравниванию, называют электрическим напряжением.

Таким образом, если соединить проводником два тела с различными зарядами (например, две обкладки заряженного конденсатора), то под действием приложенного напряжения по проводнику будет протекать ток до выравнивания зарядов.

Электрический ток I определяет количество электричества q, проходящее через поперечное сечение проводника в единицу времени t:

$$I = \frac{q}{t}. \qquad (2.1)$$

В замкнутой цепи электрический ток протекает под действием электродвижущей силы (ЭДС) источника энергии.

Электродвижущая сила – сила, перемещающая заряды, – создается в источнике силами неэлектрического происхождения, сторонними силами, т. е. силами, подведенными к источнику извне. Например, у

генератора – это механическая сила, у фотоэлемента – свет, у термоэлемента – тепло.

Возбуждаемая электродвижущая сила разделяет заряды в источнике на положительные и отрицательные и сообщает им потенциальную энергию W. ЭДС численно равна энергии, приходящейся на единицу заряда:

$$E = \frac{W}{q}. \qquad (2.2)$$

Энергия W измеряется в джоулях (1 джоуль = 1 ньютон · метр), а заряд q – в кулонах. Единица ЭДС = 1 джоуль / 1 кулон получила название вольт (В).

ЭДС возникает в источнике и при отсутствии тока в цепи, т. е. когда цепь разомкнута. При холостом ходе, т. е. при отсутствии тока в цепи, ЭДС равна разности потенциалов на зажимах источника энергии. Так же, как и ЭДС, разность потенциалов измеряется в вольтах.

В наличии ЭДС можно убедиться, если присоединить к полюсам источника энергии (вместо линейных проводов) вольтметр. Однако прибор покажет не величину ЭДС, а напряжение на зажимах источника.

Направленному движению электрических зарядов в любом проводнике препятствуют его молекулы и атомы. Поэтому как внешняя цепь, так и сам источник энергии создают препятствие прохождению тока. Величина, характеризующая противодействие электрической цепи прохождению электрического тока, называется электрическим сопротивлением. Устройства, включаемые в электрическую цепь и обладающие сопротивлением, называются резисторами.

Единицей измерения сопротивления является Ом. Омом называется электрическое сопротивление такого линейного проводника, в котором при неизменяющейся разности потенциалов в 1 В проходит ток в 1 А, т. е. 1 Ом = 1 В / 1 А.

Соотношение между ЭДС, сопротивлением и током в замкнутой цепи выражается законом Ома, который может быть сформулирован так: ток в замкнутой цепи прямо пропорционален ЭДС и обратно пропорционален сопротивлению всей цепи.

Ток в цепи возникает под действием ЭДС; чем больше ЭДС источника энергии, тем больше ток в замкнутой цепи. Сопротивление цепи препятствует прохождению тока, следовательно, чем больше сопротивление цепи, тем меньше ток.

Закон Ома можно выразить следующей формулой:

$$I = \frac{E}{R + R_0} \tag{2.3}$$

или

$$E = I(R + R_0), \tag{2.4}$$

где R – сопротивление внешней части цепи, Ом;

R_0 – внутреннее сопротивление источника, Ом.

Сопротивление всей цепи:

$$R + R_0 = E / I. \tag{2.5}$$

Закон Ома справедлив не только для всей цепи, но и для любого ее участка.

Если участок цепи не содержит источника энергии, то положительные заряды на этом участке перемещаются из точек более высокого потенциала к точкам более низкого потенциала. Источник энергии затрачивает энергию, поддерживая разность потенциалов между началом и концом этого участка. Эта разность потенциалов называется напряжением между началом и концом рассматриваемого участка.

Таким образом, применяя закон Ома для участка цепи, получим:

$$I = U / R. \tag{2.6}$$

Закон Ома можно сформулировать следующим образом: *сила тока на участке электрической цепи равна напряжению на зажимах этого участка, деленному на его сопротивление*.

Напряжение на участке цепи равно произведению силы тока на сопротивление этого участка, т. е.

$$U = IR. \tag{2.7}$$

Из выражения закона Ома для замкнутой цепи получим:

$$E = IR + IR_0 = U + IR_0, \tag{2.8}$$

где U, IR – падение напряжения в сопротивлении R, т. е. во внешней цепи, или, иначе, напряжение на зажимах источника энергии (генератора), В;

IR_0 – падение напряжения в сопротивлении R_0, т. е. внутри источника энергии (генератора).

Напряжение на зажимах источника энергии (генератора) равно разности между ЭДС и падением напряжения на внутреннем сопротивле-

нии этого источника, т.е.

$$U = E - IR_0. \tag{2.9}$$

Если уменьшать сопротивление внешней цепи R, то сопротивление всей цепи $R + R_0$ также уменьшится, а ток в цепи увеличится. С увеличением силы тока падение напряжения внутри источника энергии (IR_0) возрастает, так как внутреннее сопротивление R_0 источника энергии остается неизменным. Следовательно, с уменьшением сопротивления внешней цепи напряжение на зажимах источника энергии также уменьшается. При соединении зажимов источника энергии с проводником, сопротивление которого практически равно нулю, сила тока в цепи

$$I = E / R_0. \tag{2.10}$$

Это выражение определяет наибольший ток, который может быть получен в цепи данного источника.

Режим, при котором сопротивление внешней цепи практически равно нулю, называется режимом короткого замыкания. Кроме него выделяют такие режимы, как номинальный, холостого хода и согласованный.

Номинальный режим – режим работы, на который рассчитан источник (или приемник) электрической энергии. Он определяется номинальным напряжением $U_н$, номинальным током $I_н$, номинальной мощностью $P_н$.

$$P_н = U_н \cdot I_н. \tag{2.11}$$

При режиме холостого хода цепь источника разомкнута, $I_н = 0$. Падение напряжения на внутреннем сопротивлении $IR_0 = 0$. Напряжение генератора равно его ЭДС E.

Согласованный режим создается искусственно в схемах радиоэлектроники и автоматики, где нужно передать от источника к приемнику наибольшую мощность. Это условие выполняется, если сопротивление приемника подобрать равным внутреннему сопротивлению источника:

$$I_{с.р} = \frac{E}{R_0 + \left(R = R_0\right)} = \frac{E}{2R_0}. \tag{2.12}$$

Этот режим применяется в усилителях.

На всех участках неразветвленной электрической цепи ток один и тот же. Разветвленная цепь (рис. 2.2) содержит участки (ветви) с различными токами.

Место соединения трех и более проводов называют узлом. Ветвь – это участок цепи, заключенный между двумя узлами. При обходе по

ветвям цепи можно получить контур (ячейку) – замкнутое очертание, образующее неразветвленную цепь.

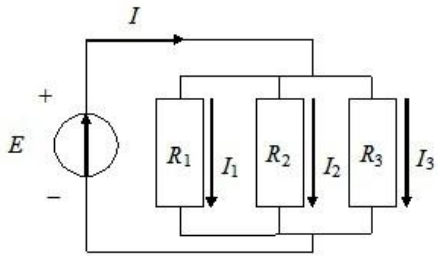


Рис. 2.2. Разветвленная электрическая цепь

В 1847 г. немецкий физик Кирхгоф экспериментально установил следующие зависимости (законы) между токами и напряжениями.

Первый закон Кирхгофа (закон для токов) применим к любому узлу электрической цепи.

Сумма токов, приходящих к узлу, равна сумме токов, уходящих от узла, или алгебраическая сумма токов в узле равна нулю:

$$\sum I = 0. \tag{2.13}$$

Если рассмотреть электрическую схему (рис. 2.2), то на основании первого закона Кирхгофа можно записать, что:

$$I = I_1 + I_2 + I_3. \tag{2.14}$$

Второй закон Кирхгофа (закон для напряжений) применим к любому контуру электрической цепи.

В контуре алгебраическая сумма электродвижущих сил равна алгебраической сумме падений напряжений:

$$\sum E = \sum IR. \tag{2.15}$$

Если рассмотреть электрическую схему (рис. 2.3), то на основании второго закона Кирхгофа можно записать, что:

$$E = U_1 + U_2 + U_3 + U_0, \tag{2.16}$$

где $U_0 = IR_0$ – падение напряжения на внутреннем сопротивлении ис-

точника.

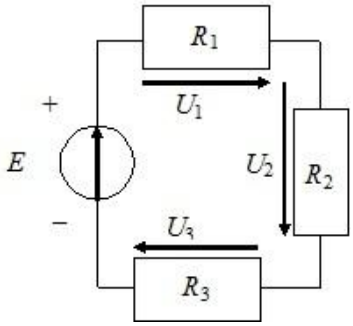


Рис. 2.3. Неразветвленная электрическая цепь

При прохождении электрического тока через металлический проводник электроны сталкиваются с молекулами. При этом расходуется энергия, которая превращается в тепло. Любое движение, при котором преодолевается сопротивление, требует затраты определенной энергии. Так, например, для перемещения какого-либо тела преодолевается сопротивление трения и работа, затраченная на это, превращается в тепло.

Электрическое сопротивление проводника играет ту же роль, что и сопротивление трения. Таким образом, для проведения тока через проводник источник тока затрачивает некоторую энергию, которая превращается в тепло. Количество выделенного тепла за время t определяется законом Джоуля – Ленца:

$$Q = RI^2t. \tag{2.17}$$

Величина, характеризующая противодействие электрической цепи прохождению электрического тока, называется *электрическим сопротивлением*.

Сопротивление проводника (Ом) подсчитывается по формуле

$$R = \rho\frac{l}{S}, \tag{2.18}$$

где ρ – удельное сопротивление материалов, Ом мм^2/м;

l – длина проводника, м;

S – площадь поперечного сечения, мм^2.

2.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципиальной электрической схемой источника постоянного тока типа 13УН-1 и табл. 2.1–2.3 для записи результатов измерений и вычислений. Записать паспортные величины и характеристики объектов и средств исследований.

Таблица 2.1. **Результаты испытания первого источника питания**

№ опыта	Измеряемые величины			Вычисляемые величины	
	$R_н$, Ом	$I_н$, А	$U_н$, В	R_{01}, Ом	E_1, В
1					
2					

Таблица 2.2. **Результаты испытания второго источника питания**

№ опыта	Измеряемые величины			Вычисляемые величины	
	$R_н$, Ом	$I_н$, А	$U_н$, В	R_{02}, Ом	E_2, В
1					
2					

Таблица 2.3. **Результаты испытания первого и второго источников питания**

№ опыта	Измеряемые величины					Вычисляемые величины			
	$R_н$, Ом	I_1, А	I_2, А	$I_н$, А	$U_н$, В	I_1, А	I_2, А	$I_н$, А	$U_н$, В
1									
2									
3									
4									

2. Собрать простую неразветвленную цепь постоянного тока (рис. 2.4), используя для этой цели первый источник питания типа 13УН-1, блок реостатов *RR*1...*RR*3, измерительные приборы *PA*1 и *PV*2. После разрешения преподавателя включить источник питания выключателем *QF*1 и установить ручкой автотрансформатора *TV*1 напряжение $U_с$ = 200–240 В (по указанию преподавателя).

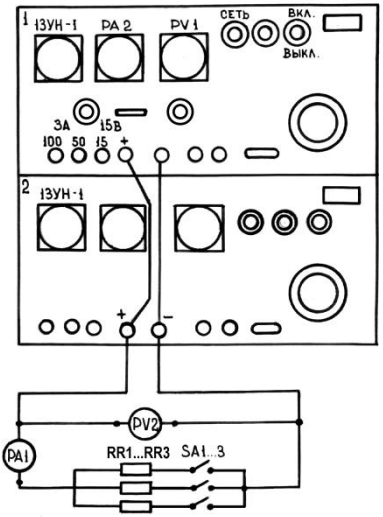


Рис. 2.4. Принципиальная электрическая схема испытания двух источников постоянного тока, включенных параллельно на общую нагрузку

Записать численные значения тока $I_н$ и напряжения $U_н$, измеренные приборами *PA*1 и *PV*2, в табл. 2.1 для двух значений $R_н$, равных соответственно 7,5 и 5 Ом. Выключить первый источник питания 13УН-1, но ручку автотрансформатора *TV*1 оставить в прежнем положении.

3. Собрать простую неразветвленную цепь постоянного тока, используя для этой цели второй источник питания типа 13УН-1, блок реостатов *RR*1…*RR*3, измерительные приборы *PA*1 и *PV*2.

По аналогии с п. 2 получить и записать значения напряжения $U_н$ и тока $I_н$ в табл. 2.2 для тех же значений сопротивлений реостата $R_н$. Выключить второй источник питания 13УН-1, но ручку автотрансформатора *TV*2 также оставить в прежнем положении.

4. Собрать разветвленную цепь постоянного тока, используя для этой цели оба источника питания типа 13УН-1, соединив их параллельно с общей нагрузкой – блоком реостатов *RR*1…*RR*3. Включить оба источника питания и провести четыре опыта при различных фиксированных значениях сопротивлений $R_н = \infty$; 15; 7,5 и 5 Ом, устанавливая их с помощью однополюсных выключателей *SA*2…*SA*4.

В табл. 2.3 записать численные значения токов источников питания I_1 и I_2, тока нагрузки $I_н$ и напряжения нагрузки $U_н$. Токи I_1 и I_2 измеряются встроенными внутрь источников питания амперметрами *PA*2 при установке переключателей *SA*1 в положение «30 А». Выключить источники питания и обесточить установку, отключив питание сетевого распределительного щитка.

5. Используя результаты проведенных опытов, определить внутренние сопротивления R_{01} и R_{02} источников питания и их электродвижущие силы E_1 и E_2 для фиксированных и одинаковых значений питающего первичного напряжения $U_с$.

Используя формулу напряжения между двумя узлами разветвленной цепи с двумя источниками питания, вычислить токи источников питания I_1 и I_2, ток нагрузки $I_н$ и напряжение нагрузки $U_н$. Сравнить вычисленные значения этих величин с их измеренными значениями (табл. 2.3).

6. Построить внешнюю характеристику источников питания $U_н = f_1(I_н)$, их нагрузочные характеристики: $I_1 = f_2(I_н)$ и $I_2 = f_3(I_н)$.

7. Провести графический анализ работы источника постоянного тока.

2.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [1–5, 8]. Особое внимание следует уделить законам Кирхгофа и Ома, их применению для анализа электрических цепей постоянного тока.

2. Начертить принципиальные электрические схемы неразветвленной и разветвленной цепей с соответствующими измерительными приборами и обозначениями физических величин (токов, напряжений, электродвижущих сил).

3. Рассмотреть решение задач в учебном пособии [1], обратив внимание на применение метода двух узлов.

2.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. При эксплуатации источников питания типа 13УН-1 необходимо соблюдать порядок выполнения работ, установленный в «Правилах технической эксплуатации электроустановок потребителей и техники безопасности при эксплуатации электроустановок потребителей».

Запрещается работать при снятом металлическом кожухе и без за-

земления корпуса.

2. При измерении электрических величин необходимо внимательно следить за показаниями приборов и не перегружать их.

3. Для вычисления внутреннего сопротивления R_0 источника питания постоянного тока и его электродвижущей силы E необходимо воспользоваться следующими формулами:

$$R_0 = \frac{R_{н2} - R_{н1}\dfrac{I_{н1}}{I_{н2}}}{\dfrac{I_{н1}}{I_{н2}} - 1}; \qquad (2.19)$$

$$E = I_{н2} \cdot R_0 + I_{н2} \cdot R_{н2}. \qquad (2.20)$$

Индекс «1» относится к опыту, при котором $R_{н1}$ = 7,5 Ом, индекс «2» – при $R_{н2}$ = 5 Ом.

4. Для вычисления силы тока источников питания I_1, I_2 и тока нагрузки $I_н$, а также напряжения нагрузки $U_н$ следует применять следующие формулы:

$$U_н = \frac{E_1 g_{01} + E_2 g_{02}}{g_{01} + g_{02} + g_н}; \qquad (2.21)$$

$$I_1 = \frac{E_1 - U_н}{R_{01}}; \quad I_2 = \frac{E_2 - U_н}{R_{02}}; \quad I_н = \frac{U_н}{R_н}, \qquad (2.22)$$

где R_{01}, R_{02} – внутренние сопротивления источников постоянного тока;

g_{01}, g_{02}, $g_н$ – проводимости источников и реостатов нагрузки:

$$g_{01} = \frac{1}{R_{01}}; \quad g_{02} = \frac{1}{R_{02}}; \quad g_н = \frac{1}{R_н}. \qquad (2.23)$$

5. Графический анализ источника постоянного тока проводится методом пересечения характеристик (м. п. х.). Для этого по оси ординат в декартовой системе координат в масштабе нужно отложить напряжение U, а по оси абсцисс в соответствующем масштабе – силу тока I. В этой же системе координат необходимо построить внешнюю характеристику источника питания. Для этой цели мысленно проводят два опыта с простейшей цепью постоянного тока. Если сопротивление нагрузки $R_н = \infty$, то напряжение на клеммах источника равно ЭДС E, а

сила тока $I_н = 0$; если сопротивление нагрузки $R_н = 0$, то напряжение на клеммах источника равно нулю, а ток короткого замыкания $I_{нк}$ вычисляется по формуле

$$I_{нк} = E / R_0 . \qquad (2.24)$$

Таким образом получают крайние точки внешней характеристики источника постоянного тока: на оси ординат ($U = E$, $I = 0$) и на оси абсцисс ($U = 0$, $I = I_{нк}$). Прямая, соединяющая эти точки, представляет собой искомую внешнюю характеристику источника постоянного тока, удовлетворяющую любому режиму его работы: от холостого хода до короткого замыкания (рис. 2.5).

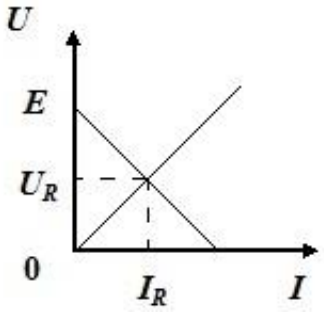


Рис. 2.5. Внешняя характеристика
линейного источника

Линия нагрузки строится следующим образом. Из начала системы координат нужно провести прямой отрезок до пересечения с внешней характеристикой источника постоянного тока в точке с координатами ($U_н$, $I_н$). Координаты точки пересечения определяют установившийся режим в цепи постоянного тока. При равных масштабах μ_I тока и μ_U напряжения угол α наклона линии нагрузки к оси абсцисс определяется по формуле

$$\alpha = \operatorname{arctg} R_н . \qquad (2.25)$$

2.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить физический смысл внутреннего сопротивления R_0 и

электродвижущей силы E источника питания.

2. Назвать основные режимы работы источника постоянного тока.

3. Влияет ли соотношение между сопротивлениями R_0 и $R_н$ на режим работы источника постоянного тока?

4. Провести графический анализ одного из источников постоянного тока, используемого в лабораторной работе.

5. Как применить первый и второй законы Кирхгофа для анализа разветвленной цепи постоянного тока с двумя источниками питания?

6. Если в разветвленной цепи с двумя источниками питания изменять внутреннее сопротивление или ЭДС одного из них, то будет ли это влиять на силу тока второго источника питания и силу тока нагрузки?

2.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Записать название и цель лабораторной работы.

2. Привести характеристику объектов и средств исследования (п. 2.1).

3. Вычертить принципиальную электрическую схему испытания двух источников постоянного тока, включенных параллельно на общую нагрузку (см. рис. 2.4).

4. Результаты исследований записать по форме табл. 2.1–2.3.

5. Построить характеристики источников постоянного тока, используя шаблоны, приведенные на рис. 2.6–2.8.

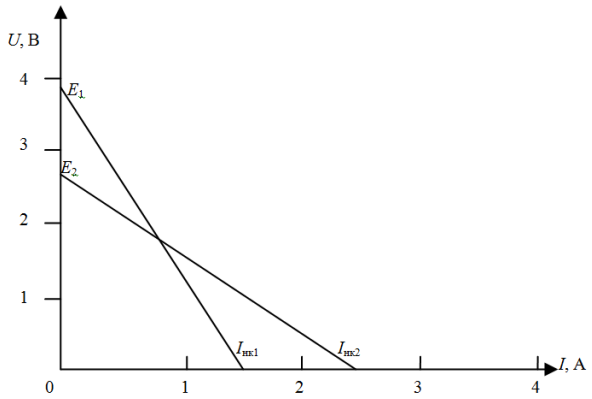


Рис. 2.6. Графики внешних характеристик источников постоянного тока

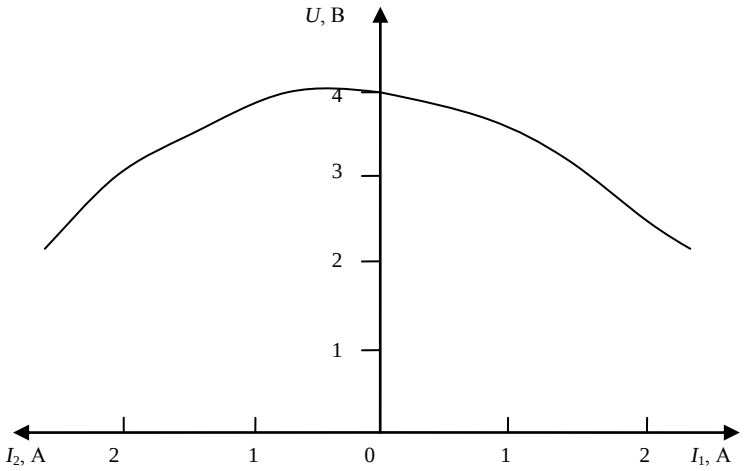


Рис. 2.7. Графики внешних характеристик первого и второго источников питания, работающих параллельно на общую нагрузку

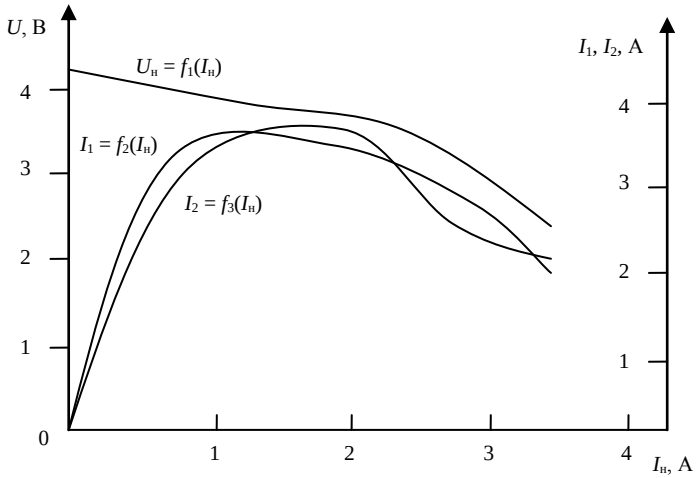


Рис. 8. Внешние (нагрузочные) характеристики источников постоянного тока: $U_н = f_1(I_н)$, $I_1 = f_2(I_н)$, $I_2 = f_3(I_н)$

Лабораторная работа № 3.
РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ

Цели работы: 1. Изучить основные соотношения, возникающие в электрических цепях с последовательным соединением приемников.

2. Получить практические навыки расчета электрических цепей с последовательным соединением приемников.

3.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В сеть с переменным синусоидальным напряжением U и током I включены последовательно резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы (рис. 3.1–3.10). Данные для расчета заданы в таблице, в которой указаны значения напряжения или тока, активные сопротивления, индуктивности и емкости, частота питающего напряжения.

Требуется:

1) определить показания измерительных приборов, включенных в цепь: амперметра, вольтметра, ваттметра и фазометра;

2) построить векторную диаграмму напряжений;

3) для принципиальных электрических схем № 1, 2, 6–8, 10 определить собственную частоту колебаний f_o;

4) для принципиальных электрических схем № 3, 9 определить значение емкости C, при которой в цепи наступит резонанс напряжений;

5) для принципиальных электрических схем № 4, 5 определить значение индуктивности L, при которой в цепи наступит резонанс напряжений.

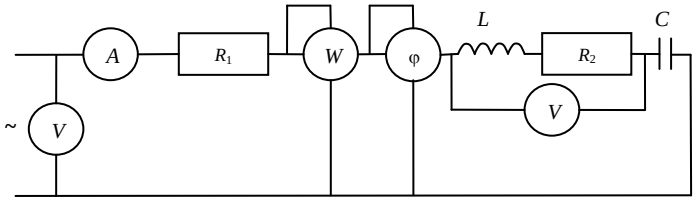


Рис. 3.1. Схема № 1

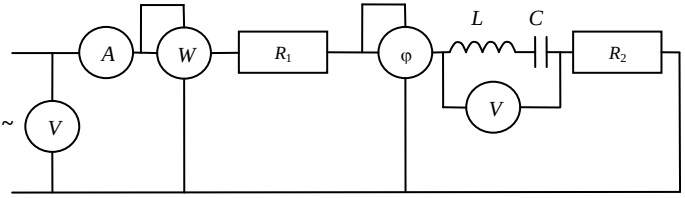


Рис. 3.2. Схема № 2

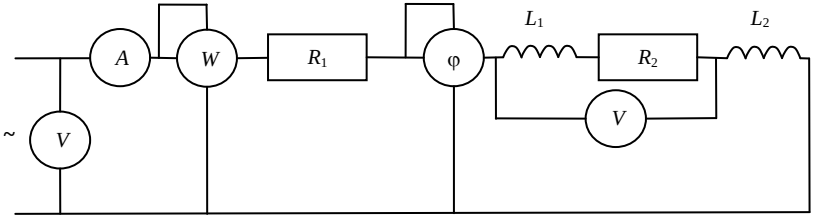


Рис. 3.3. Схема № 3

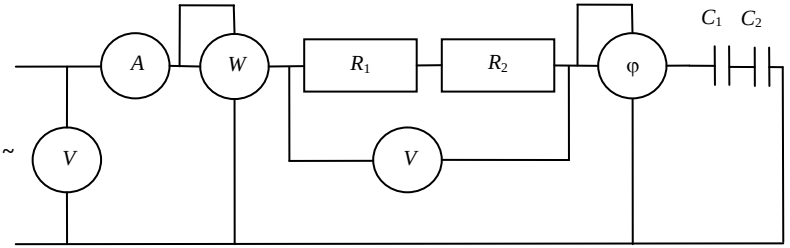


Рис. 3.4. Схема № 4

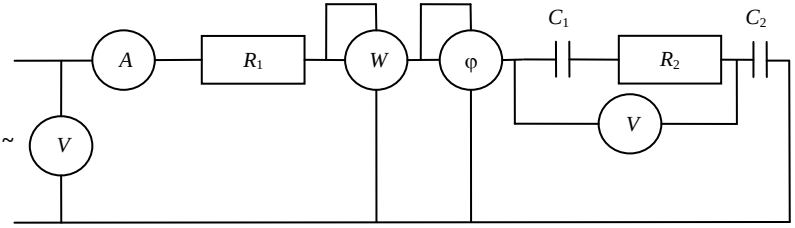


Рис. 3.5. Схема № 5

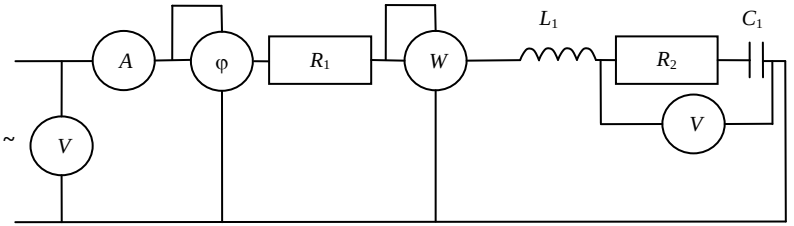


Рис. 3.6. Схема № 6

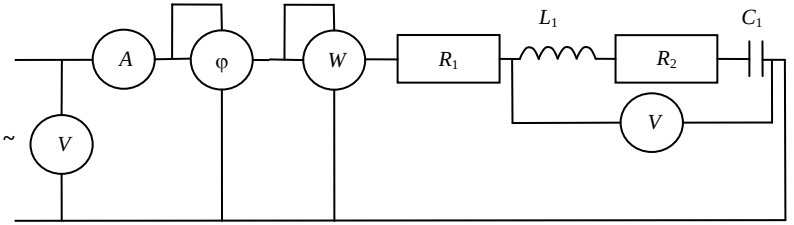


Рис. 3.7. Схема № 7

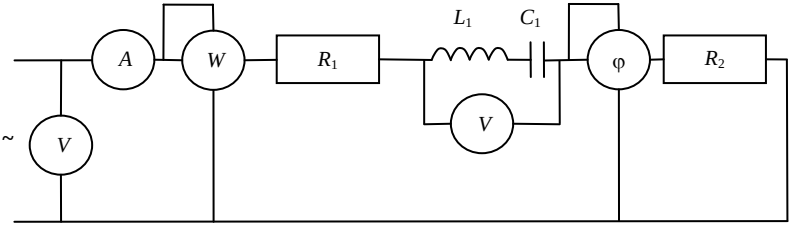


Рис. 3.8. Схема № 8

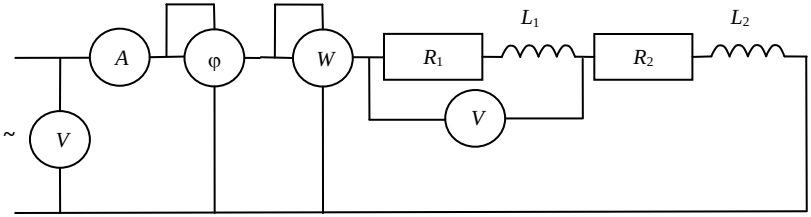


Рис. 3.9. Схема № 9

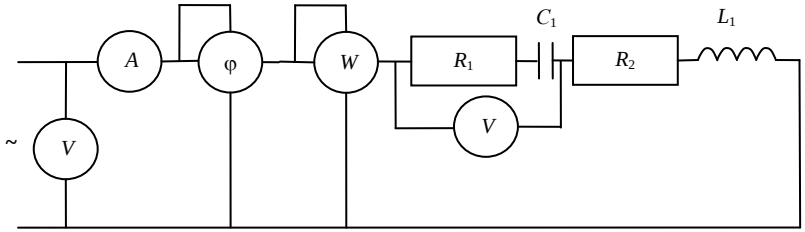


Рис. 3.10. Схема № 10

Таблица 3.1. **Исходные данные**

Варианты		Данные для расчета								
Номер схемы	Строка	U	I	f	R_1	R_2	L_1	L_2	C_1	C_2
		В	А	Гц	Ом	Ом	мГн	мГн	мкФ	мкФ
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
1	1	100	–	50	10	20	100	–	200	–
	2	–	5	45	11	19	110	–	190	–
	3	110	–	40	12	18	120	–	180	–
	4	–	4,5	35	13	17	130	–	170	–
	5	120	–	30	14	16	140	–	160	–
	6	–	4	25	15	15	150	–	150	–
	7	130	–	20	16	14	160	–	140	–
	8	–	3,5	15	17	13	170	–	130	–
	9	140	–	10	18	12	180	–	120	–
	10	–	3	50	19	11	190	–	110	–
2	1	100	–	60	20	10	200	–	100	–
	2	–	2,5	55	19	11	190	–	110	–
	3	110	–	50	18	12	180	–	120	–
	4	–	2	45	17	13	170	–	130	–
	5	120	–	40	16	14	160	–	140	–
	6	–	1,5	35	15	15	150	–	150	–
	7	130	–	30	14	16	140	–	160	–
	8	–	1	25	13	17	130	–	170	–
	9	140	–	20	12	18	120	–	180	–
	10	–	0,5	15	11	19	110	–	190	–
3	1	100	–	60	15	15	90	10	–	–
	2	–	5	55	14	16	85	15	–	–
	3	110	–	50	13	17	80	20	–	–
	4	–	4,5	45	12	18	75	25	–	–
	5	120	–	40	11	19	70	30	–	–
	6	–	4	35	10	20	65	35	–	–
	7	130	–	30	9	21	60	40	–	–
	8	–	3,5	25	8	22	55	45	–	–

Продолжение табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
3	9	140	–	20	7	23	50	50	–	–
	10	–	3	15	6	24	45	55	–	–
4	1	100	–	60	15	15	–	–	900	100
	2	–	2,5	55	16	14	–	–	850	150
	3	110	–	50	17	13	–	–	800	200
	4	–	2	45	18	12	–	–	750	250
	5	120	–	40	19	11	–	–	700	300
	6	–	1,5	35	20	10	–	–	650	350
	7	130	–	30	21	9	–	–	600	400
	8	–	1	25	22	8	–	–	550	450
	9	140	–	20	23	7	–	–	500	500
	10	–	0,5	15	24	6	–	–	450	550
5	1	100	–	60	30	2	–	–	400	600
	2	–	5	55	28	4	–	–	350	650
	3	110	–	50	26	6	–	–	300	700
	4	–	4,5	45	24	8	–	–	250	750
	5	120	–	40	22	10	–	–	200	800
	6	–	4	35	20	12	–	–	150	850
	7	130	–	30	18	14	–	–	100	900
	8	–	3,5	25	16	16	–	–	450	550
	9	140	–	20	14	18	–	–	500	500
	10	–	3	15	12	20	–	–	550	450
6	1	100	–	60	11	21	100	–	200	–
	2	–	2,5	55	10	22	105	–	195	–
	3	110	–	50	9	23	110	–	190	–
	4	–	2	45	8	24	115	–	185	–
	5	120	–	40	7	25	120	–	180	–
	6	–	1,5	35	6	26	125	–	175	–
	7	130	–	30	5	27	130	–	170	–
	8	–	1	25	4	28	135	–	165	–
	9	140	–	20	15	30	140	–	160	–
	10	–	0,5	15	10	25	145	–	155	–
7	1	100	–	60	20	8	150	–	150	–
	2	–	5	55	21	10	155	–	145	–
	3	110	–	50	22	12	160	–	140	–
	4	–	4,5	45	23	14	165	–	135	–
	5	120	–	40	24	16	170	–	130	–
	6	–	4	35	25	18	175	–	125	–
	7	130	–	30	26	20	180	–	120	–
	8	–	3,5	25	27	22	185	–	115	–
	9	140	–	20	28	24	190	–	110	–
	10	–	3	15	29	26	195	–	105	–
8	1	100	–	60	8	20	100	–	200	–
	2	–	2,5	55	10	21	110	–	190	–
	3	110	–	50	12	22	120	–	180	–

Окончание табл. 3.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
8	4	–	2	45	14	23	130	–	170	–
	5	120	–	40	16	24	140	–	160	–
	6	–	1,5	35	18	25	150	–	150	–
	7	130	–	30	20	26	160	–	140	–
	8	–	1	25	22	27	170	–	130	–
	9	140	–	20	24	28	180	–	120	–
	10	–	0,5	15	26	29	190	–	110	–
9	1	100	–	60	10	20	50	50	–	–
	2	–	5	55	11	19	55	45	–	–
	3	110	–	50	12	18	60	40	–	–
	4	–	4,5	45	13	17	65	35	–	–
	5	120	–	40	14	16	70	30	–	–
	6	–	4	35	15	15	75	25	–	–
	7	130	–	30	16	14	80	20	–	–
	8	–	3,5	25	17	13	85	15	–	–
	9	140	–	20	18	12	90	10	–	–
	10	–	3	15	19	11	100	100	–	–
10	1	100	–	60	20	10	200	–	100	–
	2	–	2,5	55	19	11	190	–	110	–
	3	110	–	50	18	12	180	–	120	–
	4	–	2	45	17	13	170	–	130	–
	5	120	–	40	16	14	160	–	140	–
	6	–	1,5	35	15	15	150	–	150	–
	7	130	–	30	14	16	140	–	160	–
	8	–	1	25	13	17	130	–	170	–
	9	140	–	20	12	18	120	–	180	–
	10	–	0,5	15	11	19	110	–	190	–

3.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету однофазной цепи переменного синусоидального тока с последовательным соединением резисторов R_i, индуктивных катушек X_{Lj} и конденсаторов X_{Ck}.

В условии задачи даны численные значения активных сопротивлений R в омах (Ом), индуктивностей катушек L в миллигенри (мГн), емкостей конденсаторов C в микрофарадах (мкФ), частота напряжения или тока f в герцах (Гц), входное напряжение U в вольтах (В) или входной ток I в амперах (А) (таблица).

Сопротивление индуктивной катушки X_L определяется по формуле

$$X_L = \omega L = 2\pi f L, \tag{3.1}$$

где ω – угловая частота, $с^{-1}$;

f – промышленная частота, Гц;

L – индуктивность катушки, Гн.

Сопротивление конденсатора вычисляется по формуле

$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}, \tag{3.2}$$

где C – емкость конденсатора, Ф.

Примечание. Чтобы получить значения реактивных сопротивлений в омах, необходимо в соответствующие формулы подставлять значения индуктивностей и емкостей соответственно в генри (Гн) и фарадах (Ф) (1 мГн = 10^{-3} Гн, 1 мкФ = 10^{-6} Ф).

Полное сопротивление Z последовательной цепи вычисляется по формуле

$$Z = \sqrt{(\sum R_i)^2 + (\sum X_{Li} - \sum X_{Ci})^2}, \tag{3.3}$$

где Σ – оператор, означающий суммирование;

i – порядковый номер элемента.

Сила тока в цепи определяется по заданному напряжению U и полному сопротивлению Z по закону Ома:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{(\sum R_i)^2 + (\sum X_{Li} - X_{Ci})^2}}. \tag{3.4}$$

Входное напряжение определяется по соответствующей формуле

$$U = IZ = I = \sqrt{(\sum R_i)^2 + (\sum X_{Li} - \sum X_{Ci})^2}. \tag{3.5}$$

Показание ваттметра численно равно значению активной мощности участка цепи в ваттах (Вт) или в киловаттах (кВт) и вычисляется по формуле

$$P = I^2 \sum R_k, \tag{3.6}$$

где ΣR_k – сумма активных сопротивлений участка цепи, к которому подключен ваттметр, Ом.

Показание фазометра определяется по формулам

$$\arccos\varphi = \frac{R_k}{Z_k};\ \arcsin\varphi = \frac{X_{Lk} - X_{Ck}}{Z_k};\ \arctan\varphi = \frac{X_{Lk} - X_{Ck}}{R_k}, \quad (3.7)$$

где R_k – активное сопротивление участка цепи, к которому подключена катушка напряжения фазометра, Ом;

X_{Lk}, X_{Ck} – реактивное сопротивление участка цепи, к которому подключена катушка напряжения фазометра, Ом;

Z_k – полное сопротивление данного участка, Ом.

Показание вольтметра на участке цепи вычисляется по формуле (3.5), в которой сопротивление Z заменяется сопротивлением Z_k участка цепи, к которому подключен вольтметр.

Показание амперметра численно равно значению тока I из формулы (3.4).

Собственная частота колебаний f_0 вычисляется по формуле

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad (3.8)$$

где L – общая индуктивность цепи, Гн;

C – общая емкость цепи, Ф.

Формулы для вычисления L и C имеют вид

$$L = L_1 + L_2 + \ldots + L_i; \quad (3.9)$$

$$\frac{1}{C} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \ldots + \frac{1}{C_i}. \quad (3.10)$$

Значение резонансной емкости или индуктивности определяется из условия резонанса напряжений для последовательной цепи:

$$\sum X_{Li} = \sum X_{Ci}. \quad (3.11)$$

Векторную диаграмму напряжений цепи нужно строить следующим образом:

1) записать векторное уравнение напряжений на основании 2-го закона Кирхгофа:

$$\bar{U} = \bar{U}_{R1} + \bar{U}_{R2} + \bar{U}_{L1} + \bar{U}_{L2} + \bar{U}_{C1} + \bar{U}_{C2}; \quad (3.12)$$

2) выбрать базовый вектор, относительно которого строят векторную диаграмму напряжений. В последовательной цепи это, как прави-

ло, вектор тока $\bar{I}$;

3) учесть, что векторы $\bar{U}_{Ri}$ совпадают по фазе с вектором тока $\bar{I}$, векторы $\bar{U}_{Li}$ опережают вектор $\bar{I}$ на 90°, а векторы $\bar{U}_{Ci}$ отстают от вектора $\bar{I}$ на 90°; кроме того, стоит иметь в виду, что векторные слагаемые формулы (12) подчиняются законам переместительности и сочетательности.

3.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В сеть с переменным синусоидальным напряжением U = 120 В, частотой f = 50 Гц последовательно включены: L = 38 Гн; R_1 = 5 Ом; R_2 = 3 Ом; C = 177 мкФ.

Требуется определить показания электроизмерительных приборов, включенных в цепь (рис. 3.11), резонансную частоту f_0, построить векторную диаграмму напряжений.

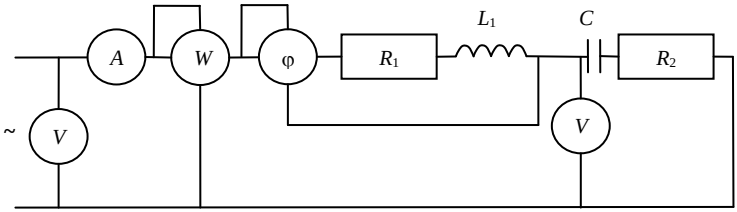


Рис. 3.11. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Решение:

1. Определяем сопротивление индуктивной катушки:

$$X_L = 2\pi fL = 2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 38 \cdot 10^{-3} = 11{,}9 \text{ Ом}.$$

2. Определяем сопротивление конденсатора:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 50 \cdot 177 \cdot 10^{-6}} = 18 \text{ Ом}.$$

3. Находим полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (X_L - X_C)^2} = \sqrt{(5+3)^2 + (11{,}9-18)^2} = 10 \text{ Ом}.$$

4. Вычисляем показание амперметра:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{120}{10} = 12 \text{ А}.$$

5. Определяем показание ваттметра:

$$P = I^2(R_1 + R_2) = 12^2 \cdot (5+3) = 1152 \text{ Вт}.$$

6. Вычисляем показание вольтметра на участке цепи:

$$U_1 = I\sqrt{R_2^2 + X_C^2} = 12 \cdot \sqrt{3^2 + 18^2} = 219 \text{ В}.$$

7. Находим показание фазометра:

$$\varphi = \text{arctg}\frac{X_L}{R_1} = \text{arctg}\frac{11{,}9}{5} = 67°21'1''.$$

8. Определяем значение резонансной частоты:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = \frac{1}{2 \cdot 3{,}14 \cdot \sqrt{38 \cdot 10^{-3} \cdot 177 \cdot 10^{-6}}} = 61{,}4 \text{ Гц}.$$

9. Для построения векторной диаграммы выберем в качестве оси вектор силы тока $\bar{I}$, масштаб векторов напряжений μ_U = 50 В/см и вычислим напряжение на отдельных элементах цепи:

$$U_L = X_L I = 11{,}9 \cdot 12 = 142{,}8 \text{ В};$$

$$U_{R1} = R_1 I = 5 \cdot 12 = 60 \text{ В};$$

$$U_{R2} = R_2 I = 3 \cdot 12 = 36 \text{ В};$$

$$U_C = X_C I = 18 \cdot 12 = 216 \text{ В}.$$

Векторная диаграмма в выбранном масштабе построена на рис. 3.12.

Векторы напряжений на активных сопротивлениях $\bar{U}_{R1}$ и $\bar{U}_{R2}$ совпадают по направлению с вектором тока $\bar{I}$, вектор $\bar{U}_L$ опережает, а вектор $\bar{U}_C$ отстает от вектора тока $\bar{I}$ на четверть периода, или 90°. Вектор напряжения на зажимах цепи $\bar{U}$ равен геометрической сумме напряжений на всех ее элементах.

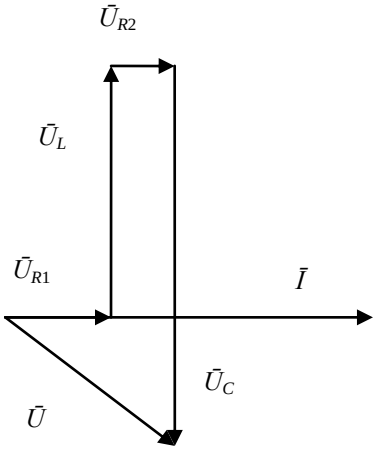


Рис. 3.12. Векторная диаграмма

Лабораторная работа № 4. ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ДРОССЕЛЯ И КОНДЕНСАТОРА

Цели работы: 1) изучить основные соотношения между токами в ветвях цепи с дросселем и конденсатором и током неразветвленного участка цепи;

2) изучить метод амперметра – вольтметра – ваттметра для определения активного, реактивного и полного сопротивлений дросселя и конденсатора;

3) экспериментально определить сопротивления дросселя и конденсатора.

4.1. ОБЪЕКТЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, в которой объектами исследования являются дроссель и конденсатор, соединенные параллельно. Номинальное напряжение $U_{\text{Н}}$ дросселя равно 40 В, конденсатора – 60 В.

Средства исследования представлены малокосинусным ваттметром электродинамической системы типа Д522 с напряжением $U_{\text{Н}} = 75, 150,$

300, 600 В и силой тока $I_{Н}$ = 0,25; 0,5; 1 А; амперметром электромагнитной системы типа Э59 с силой тока $I_{Н}$ = 1 и 2 А; амперметрами электродинамической системы типа Д533 с силой тока $I_{Н}$ = 2,5 и 5 А; вольтметром электромагнитной системы типа Э59/105 с напряжением $U_{Н}$ = 50 В.

В состав установки входят трансформатор понижающий типа ОС с напряжением $U_{1Н}/U_{2Н}$ = 220/36 В и автотрансформатор типа ЛАТР-2М с напряжением $U_{1Н}/U_{2Н}$ = 220/0–250 В.

4.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ДРОССЕЛЯ И КОНДЕНСАТОРА

Дроссель – это один из видов катушки индуктивности, представляет собой специальную медную проволоку, намотанную на сердечник. Однако бывают дроссели и без сердечника – бескаркасные или воздушные. Внешне некоторые похожи на трансформатор. Отличие заключается в том, что дроссель имеет только одну обмотку, а у трансформатора их две или больше. Дроссели без сердечника представляют собой намотанную спиралью проволоку (рис. 4.1).

Рис. 4.1. Варианты исполнения дросселей

Дроссель на схеме обозначается графическим изображением полу-

волны. Если он с магнитным сердечником, добавляется черта. Дроссель используют как индуктивное сопротивление, задерживающее или сглаживающее скачки тока. Как и резистор, катушка индуктивности имеет определенное сопротивление, что вызывает падение напряжения и ограничивает ток. Вот только греется она намного меньше. Дроссель часто используют как индуктивную нагрузку.

В некоторых устройствах (люминесцентных лампах) дроссель ставят для накопления заряда. Во всякого рода фильтрах его используют для подавления нежелательных частот.

Конденсатором называется элемент электрической цепи, способный сосредоточивать, накапливать и отдавать другим элементам заряд электрического тока. В самом простом варианте он состоит из двух электродов, накапливающих разноименные заряды и поэтому разделенных между собой слоем диэлектрика (рис. 4.2).

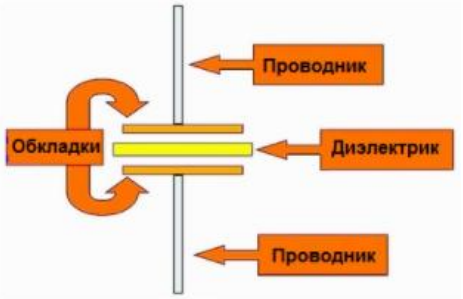


Рис. 4.2. Структурная схема конденсатора

При прохождении постоянного тока через конденсатор происходит его заряд (рис. 4.3, *а*) до напряжения между обкладками *U*, равного ЭДС источника *E*. Если заряженный конденсатор замкнуть на какое-либо сопротивление *R* (рис. 4.3, *б*), то под действием напряжения на конденсаторе будет протекать ток разряда.

Если рассматривать процессы, происходящие в цепи, содержащей конденсатор и источник переменного тока, то нетрудно заметить, что эти процессы сводятся к периодическому заряду и разряду конденсатора. Поэтому создается впечатление, что переменный ток проходит через конденсатор.

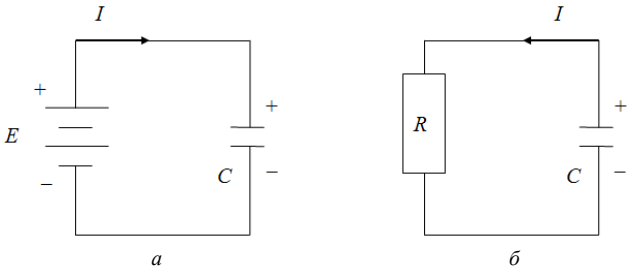


Рис. 4.3. Заряд (*а*) и разряд (*б*) конденсатора

В цепи переменного тока с параллельным соединением сопротивлений (рис. 4.4) напряжение является общим для всех приемников, а ток в каждой ветви определяется соотношениями

$$I_1 = \frac{U}{Z_1};\ I_2 = \frac{U}{Z_2}. \tag{4.1}$$

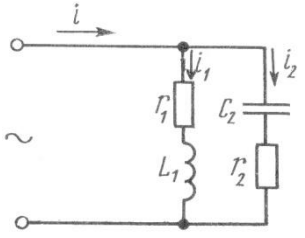


Рис. 4.4. Цепь переменного тока
с параллельным соединением сопротивлений

Ток в неразветвленной части цепи определяется как векторная сумма токов отдельных ветвей:

$$I = I_1 + I_2. \tag{4.2}$$

В электрической цепи при параллельном соединении емкостной и индуктивной нагрузок возникает резонанс токов, если равны индуктивные и емкостные проводимости ветвей ($b_L = b_C$).

Рассмотрим идеальную цепь (рис. 4.5), в которой отсутствует активное сопротивление.

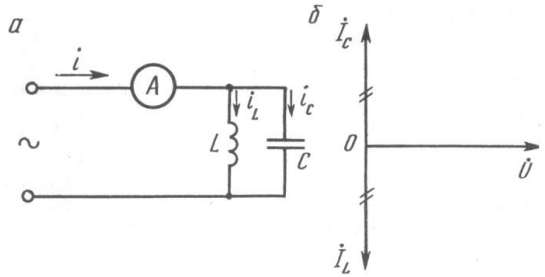


Рис. 4.5. Схема идеальной цепи (*а*) и векторная диаграмма (*б*) резонанса токов

При этом токи в индуктивной и емкостной нагрузках равны по величине и противоположны по направлению ($I_L = b_L U$; $I_C = b_C U$). Ток в индуктивной нагрузке отстает от напряжения на 90º, а в емкостной опережает его на 90º ($I_L = -I_C$). Следовательно, при резонансе в рассматриваемой идеальной цепи в подводящих проводах сила тока равна нулю:

$$\boldsymbol{I} = \boldsymbol{I}_L + \boldsymbol{I}_C = 0. \tag{4.3}$$

Рассмотрим теперь реальную цепь (рис. 4.6, *а*). Пусть в ветви с индуктивным сопротивлением имеется и активное сопротивление, что практически соответствует подключению двигателя. В ветви с емкостным сопротивлением сила тока определится по формуле $I_C = b_C U$. В ветви с индуктивным сопротивлением ток ($I_1 = y_1 U$) состоит из активной составляющей $I_{a1} = g_1 U$ и индуктивной составляющей $I_L = -b_L U$ (рис. 4.6, *б*). В режиме резонанса индуктивная составляющая тока $I_{L1} = -b_L U$ первой ветви равна по значению и противоположна по направлению току второй ветви:

$$\boldsymbol{I}_{L1} = -\boldsymbol{I}_{\mathrm{C}}. \tag{4.4}$$

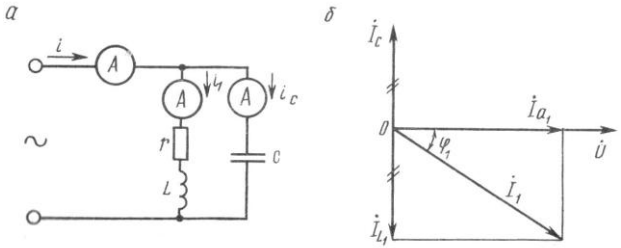


Рис. 4.6. Схема реальной цепи (*а*) и векторная диаграмма (*б*) резонанса токов

Ток в подводящих проводах будет состоять только из активной составляющей тока цепи, т.е.

$$I = I_{\text{а}} + I_{L1} + I_{\text{C}} = I_{\text{а}}. \qquad (4.5)$$

При этом реактивные токи замыкаются в параллельном контуре и могут в десятки раз превышать силу тока в подводящих проводах. Поэтому резонанс при параллельном соединении емкостной и индуктивной нагрузок называется резонансом токов. При резонансе токов сдвиг фаз между током и напряжением в цепи равен нулю (cos φ = 1), цепь обладает активным сопротивлением. Векторная диаграмма токов и напряжения при резонансе токов изображена на рис. 4.6, *б*. Сила тока в подводящих проводах принимает минимальное значение.

Для демонстрации резонанса токов собирают электрическую цепь с параллельным включением батареи конденсаторов и катушки индуктивности (см. рис. 4.5). Изменяя емкость батареи конденсаторов при постоянной индуктивности катушки или индуктивность при постоянной емкости, добиваются минимального показания амперметра, включенного в неразветвленную часть цепи, что соответствует резонансу токов. При этом приложенное напряжение необходимо поддерживать постоянным. Амперметры, включенные в ветви цепи, покажут максимальную силу тока, при этом их показания будут одинаковыми, согласно формуле (4.4).

Режим резонанса токов имеет большое практическое значение в технике сильных токов. При резонансе токов их колебания происходят внутри колебательного контура, внешний источник тока только пополняет потери энергии на активном сопротивлении. В электрических сетях частично происходит обмен энергией между генераторами и потребителями, что загружает сеть реактивными токами и увеличивает потери энергии на нагревание проводов. Чтобы избавить сеть от этих потерь, параллельно приемнику с индуктивным сопротивлением подключают конденсаторы, чем и создают колебательный контур на месте приемника. Параллельное подключение конденсаторов к активно-индуктивной нагрузке повышает коэффициент мощности нагрузки (cos φ).

Коэффициент мощности (cos φ) показывает, какую часть от полной мощности S составляет активная мощность P. Следовательно, второй составляющей полной мощности является реактивная, которая обозначается буквой Q. Из определения полной мощности ($S = IU$) как суммы активной ($P = IU\cos\varphi$) и реактивной можно записать формулу реак-

тивной мощности:

$$Q = IU\sin\varphi. \qquad (4.6)$$

Реактивная мощность характеризует среднюю скорость накопления и убыли энергии магнитного или электрического поля цепи. Активная мощность определяет скорость преобразования электрической энергии в другие виды энергии (световую, механическую, химическую, внутреннюю).

Коэффициент мощности cos φ имеет большое практическое значение. Увеличение cos φ дает возможность полнее использовать номинальную мощность генератора, трансформатора и другого оборудования. При cos φ = 0,7 активная мощность составляет только 70 % номинальной мощности трансформатора, т. е. все электрооборудование используется на 70 % своей номинальной мощности.

Недогрузка оборудования (генераторов, турбин, трансформаторов) ведет к излишним материальным затратам и экономически невыгодна. Кроме того, недогрузка генераторов, двигателей и трансформаторов приводит к увеличению ненужной реактивной мощности сети.

Увеличение cos φ повышает КПД установки. Следовательно, для передачи одной и той же мощности при большем cos φ нужны провода меньшего сечения, более легкие опоры и другое оборудование линий электропередач, что требует меньшего расхода металла и меньшего капиталовложения на сооружение воздушных линий и установку оборудования.

Коэффициент мощности повышают естественным (без применения специальных устройств) и искусственным (с применением различных компенсирующих устройств) способами. При этом наиболее эффективным является искусственный способ повышения коэффициента мощности, сутью которого является получение требуемого значения угла сдвига фаз в цепи за счет изменения емкости конденсатора.

4.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципиальной электрической схемой лабораторной установки (рис. 4.7) и подготовить макет табл. 4.1–4.3 для записи результатов наблюдений.

2. Собрать цепь в соответствии с рис. 4.7 и после разрешения преподавателя включить ее в сеть. Выключателем *SA*1 подключить дроссель *LR*, установить по указанию преподавателя значения напряжения на его катушке U_L (рукояткой автотрансформатора) и силы тока I_L

(подвижным стержнем его магнитопровода). Записать в табл. 4.1 значения напряжения U_L по вольтметру $PV1$, силы тока дросселя I_L по амперметру $PA2$ и активной мощности P_L по ваттметру $PW1$. Вычислить полное Z_L, активное R_L и индуктивное X_L сопротивления дросселя, коэффициент активной мощности $\cos\varphi_L$ и угол φ_L между векторами напряжения $\bar{U}_L$ и тока $\bar{I}_L$.

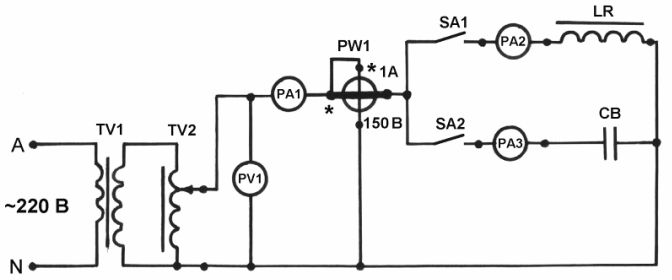


Рис. 4.7. Принципиальная электрическая схема испытания однофазной цепи с параллельным соединением дросселя и конденсатора

Таблица 4.1. **Результаты исследования дросселя**

Измеряемые величины			Вычисляемые величины				
U_L, В	I_L, А	P_L, Вт	Z_L, Ом	R_L, Ом	X_L, Ом	$\cos\varphi_L$	φ_L, град

Таблица 4.2. **Результаты исследования конденсатора**

Измеряемые величины			Вычисляемые величины				
U_C, В	I_C, А	P_C, Вт	Z_C, Ом	R_C, Ом	X_C, Ом	$\cos\varphi_C$	φ_C, град

Таблица 4.3. **Результаты исследования цепи с параллельным соединением дросселя и конденсатора**

Измеряемые величины					Вычисляемые величины					
U, В	I, А	P, Вт	I_L, А	I_C, А	y, См	g, См	b, См	$\cos\varphi$	φ, град	I, А

3. Отключить дроссель, затем выключателем $SA2$ подключить конденсатор CB, установить по указанию преподавателя напряжение на

конденсаторе U_C по вольтметру *PV*1. Записать в табл. 4.2 значения силы тока конденсатора I_C по амперметру *PA*3, напряжения U_C по вольтметру *PV*1 и активной мощности P_C по ваттметру *PW*1.

Вычислить полное Z_C, активное R_C и емкостное X_C сопротивления конденсатора, коэффициент его активной мощности $\cos \varphi_C$ и угол φ_C между векторами напряжения $\bar{U}_C$ и тока $\bar{I}_C$.

4. Включить одновременно дроссель *LR* и конденсатор *CB* выключателями *SA*1 и *SA*2, установить по указанию преподавателя напряжение *U* по вольтметру *PV*1 и силу тока дросселя I_L по амперметру *PA*2.

Записать в табл. 4.3 значения силы тока дросселя I_L, конденсатора I_C, активной мощности *P* цепи, общей силы тока *I* и напряжения *U*.

По результатам опыта вычислить полную *y*, активную *g* и реактивную *b* проводимости цепи. Определить коэффициент активной мощности цепи $\cos \varphi$ и угол φ между векторами напряжения $\bar{U}$ и общего тока $\bar{I}$.

5. Построить векторные диаграммы напряжения и тока для дросселя и конденсатора, а также диаграмму напряжений и токов для всей цепи. Сравнить между собой эти векторные диаграммы. По данным табл. 4.1 и 4.2 рассчитать силу тока в неразветвленном участке цепи и сравнить расчетное значение тока *I* с опытным значением из табл. 4.3.

4.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [1–2, 4, 9].

2. Изучить методику измерения параметров дросселя и конденсатора с помощью измерительных приборов – амперметра, вольтметра, ваттметра.

3. Изучить методику построения векторных диаграмм тока и их применение для анализа цепей.

4.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Полные сопротивления катушки дросселя Z_L и конденсатора Z_C вычисляются по формулам

$$Z_L = \frac{U_L}{I_L}; \qquad Z_C = \frac{U_C}{I_C}. \tag{4.7}$$

Активные сопротивления дросселя R_L и конденсатора R_C вычисля-

ются по формулам

$$R_L = \frac{P_L}{I_L^2}; \qquad R_C = \frac{P_C}{I_C^2}. \tag{4.8}$$

Индуктивное сопротивление дросселя X_L и емкостное сопротивление конденсатора X_C вычисляются следующим образом:

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}; \qquad X_C = \sqrt{Z_C^2 - R_C^2}. \tag{4.9}$$

2. Коэффициенты активной мощности дросселя $\cos\ \varphi_L$ и конденсатора $\cos\ \varphi_C$ вычисляются по формулам

$$\cos\ \varphi_L = \frac{P_L}{U_L I_L}; \qquad \cos\ \varphi_C = \frac{P_C}{U_C I_C}, \tag{4.10}$$

откуда

$$\varphi_L = \arccos\left(\frac{P_L}{U_L I_L}\right); \qquad \varphi_C = \arccos\left(\frac{P_C}{U_C I_C}\right). \tag{4.11}$$

3. Полная y, активная g и реактивная b проводимости всей цепи вычисляются по формулам

$$y = \frac{I}{U}; \qquad g = \frac{P}{U^2}; \qquad b = \sqrt{y^2 - g^2}. \tag{4.12}$$

4. Коэффициент активной мощности $\cos\ \varphi$ всей цепи и фазовый угол φ между векторами напряжения $\bar{U}$ и общего тока $\bar{I}$ определяются по формулам

$$\cos\ \varphi = \frac{P}{UI}; \qquad \varphi = \arccos\left(\frac{P}{UI}\right). \tag{4.13}$$

5. Расчетное значение силы тока I в цепи вычисляется по формуле

$$I = \sqrt{(I_L \cos\ \varphi_L + I_C \cos\ \varphi_C)^2 + (I_L \sin\ \varphi_L - I_C \sin\ \varphi_C)^2}. \tag{4.14}$$

6. При построении векторной диаграммы напряжения и токов для дросселя и конденсатора необходимо учитывать знак фазового угла φ_L между векторами $\bar{U}_L$ и $\bar{I}_L$, и знак угла φ_C между векторами $\bar{U}_C$ и $\bar{I}_C$. Век-

тор тока $\bar{I}_L$ отстает от вектора напряжения $\bar{U}_L$ ($\varphi_L > 0$), а вектор тока $\bar{I}_C$, наоборот, опережает вектор напряжения $\bar{U}_C$ ($\varphi_C < 0$). При построении векторной диаграммы для разветвленной цепи исходным вектором принимается вектор напряжения $\bar{U}$, а вектор тока $\bar{I}$ в неразветвленной части цепи равен геометрической сумме векторов токов ветвей:

$$\vec{I} = \vec{I}_L + \vec{I}_C. \qquad (4.15)$$

Так как в нашем случае цепь состоит из двух ветвей, то построение векторной диаграммы осуществляется с помощью *метода параллелограмма*. Суть этого метода заключается в построении двух недостающих сторон до получения параллелограмма, а вектор общей силы тока $\bar{I}$ является диагональю получившегося параллелограмма.

4.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в цепи с параллельным соединением элементов сила тока любой из ветвей I_L или I_C превышает значение силы тока I всей цепи?

2. Почему коэффициент активной мощности всей цепи cos φ больше коэффициентов активной мощности дросселя cos φ_L и конденсатора cos φ_C?

3. Какое резонансное явление возможно в данной цепи и каковы условия его появления? Объясните физический смысл этого явления.

4. Почему и каким образом необходимо увеличивать коэффициент активной мощности цепей, которые содержат дроссели и конденсаторы?

5. Как определить знак фазового угла φ в цепи с параллельным соединением элементов?

4.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Записать название и цель лабораторной работы.

2. Привести характеристику объектов и средств исследования (п. 4.1).

3. Начертить принципиальную электрическую схему испытания однофазной цепи с параллельным соединением дросселя и конденсатора (см. рис. 4.7).

4. Результаты исследований записать в табл. 4.1–4.3.

5. Построить векторную диаграмму напряжений и тока при параллельном соединении дросселя и конденсатора (рис. 4.8, 4.9).

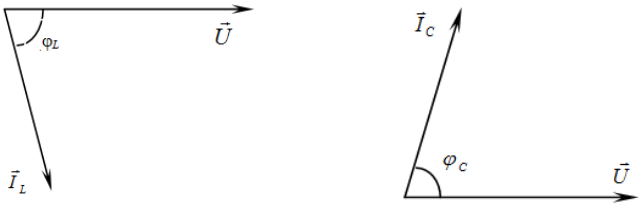


Рис. 4.8. Порядок построения нижней и верхней части векторной диаграммы напряжения и токов при параллельном соединении дросселя и конденсатора

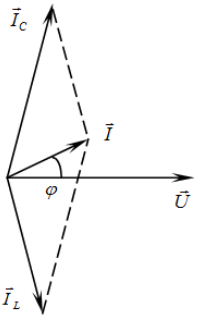


Рис. 4.9. Образец полученной векторной диаграммы

6. Сделать выводы.

Лабораторная работа № 5.
РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ ЦЕПЕЙ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ

Цели работы: 1. Изучить основные соотношения, возникающие в электрических цепях с параллельным соединением приемников.

2. Получить практические навыки расчета электрических цепей с параллельным соединением приемников.

5.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

В сеть с переменным синусоидальным напряжением U и током I, частотой $f = 50$ Гц включены последовательно-параллельно резисторы, индуктивные катушки и конденсаторы (рис. 5.1–5.10). Данные для

расчета заданы в табл. 5.1, в которой указаны значения напряжения или тока, активные, индуктивные и емкостные сопротивления.

Требуется определить:

1. Показания электроизмерительных приборов, включенных в цепь: амперметра, вольтметра, ваттметра и фазометра.

2. Построить векторную диаграмму токов.

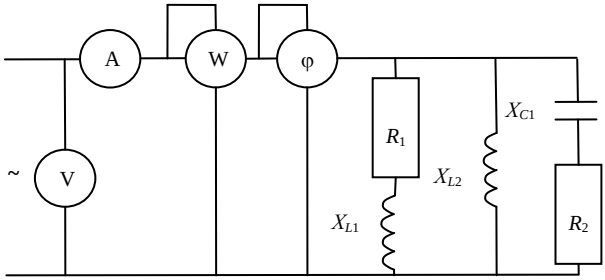


Рис. 5.1. Схема № 1

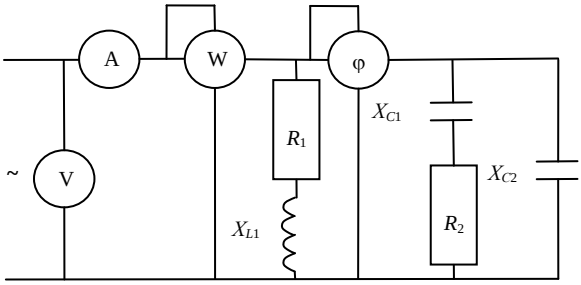


Рис. 5.2. Схема № 2

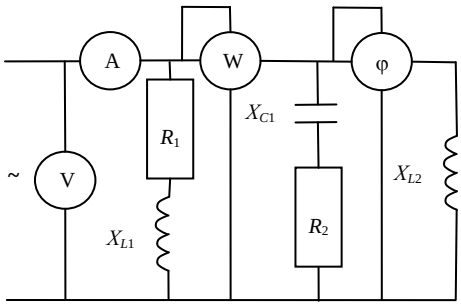


Рис. 5.3. Схема № 3

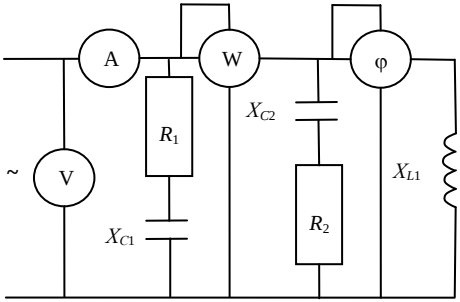


Рис. 5.4. Схема № 4

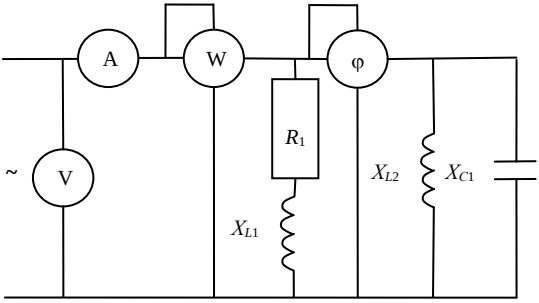


Рис. 5.5. Схема № 5

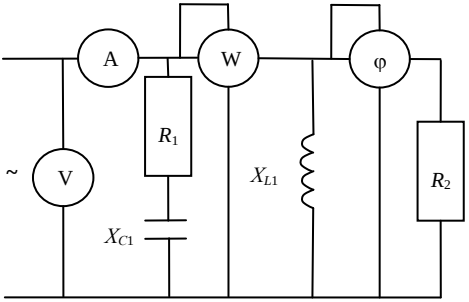


Рис. 5.6. Схема № 6

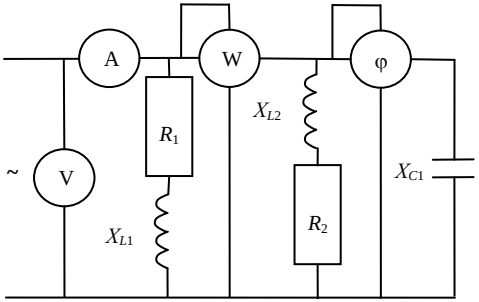


Рис. 5.7. Схема № 7

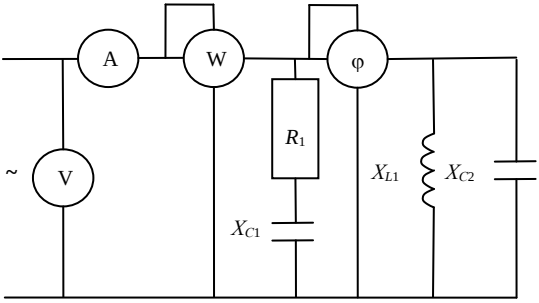


Рис. 5.8. Схема № 8

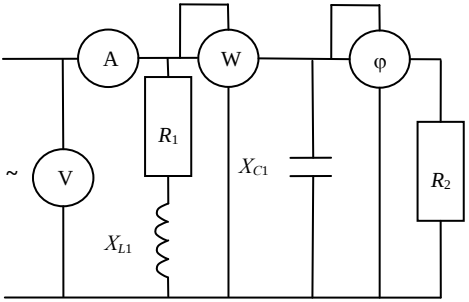


Рис. 5.9. Схема № 9

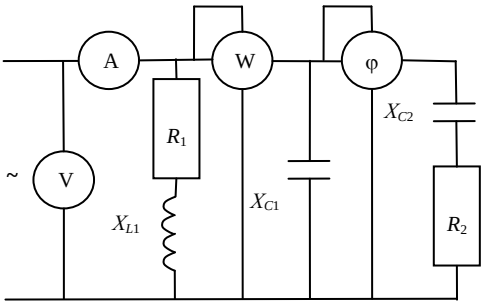


Рис. 5.10. Схема № 10

Таблица 5.1. **Исходные данные**

Варианты		Данные для расчета							
Номер схемы	Строка	U	I	R_1	R_2	X_{L1}	X_{L2}	X_{C1}	X_{C2}
		В	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	1	50	–	1	5	2	10	4	–
	2	–	10	2	4	4	8	6	–
	3	45	–	3	3	6	6	8	–
	4	–	12	4	5	8	4	10	–
	5	40	–	5	6	10	4	12	–
	6	–	14	6	7	12	6	14	–
	7	35	–	7	8	14	8	16	–
	8	–	16	8	7	16	10	18	–
	9	30	–	9	8	18	12	20	–
	10	–	18	10	9	20	15	22	–
2	1	50	–	10	1	5	–	5	4
	2	–	10	9	2	6	–	7	6
	3	45	–	8	3	7	–	9	8
	4	–	12	7	4	8	–	11	10
	5	40	–	6	5	9	–	13	12
	6	–	14	5	6	10	–	15	14
	7	35	–	4	7	11	–	17	16
	8	–	16	3	8	12	–	19	18
	9	30	–	2	9	10	–	21	20
	10	–	18	1	10	7	–	23	22
3	1	50	–	10	1	2	1	6	–
	2	–	18	9	2	4	5	7	–
	3	55	–	8	3	6	7	8	–
	4	–	16	7	4	8	9	10	–
	5	60	–	6	5	10	11	12	–
	6	–	14	5	6	12	13	14	–

Продолжение табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
3	7	65	–	4	7	14	15	16	–
	8	–	12	3	8	16	17	18	–
	9	70	–	2	9	18	19	20	–
	10	–	10	5	10	20	21	22	–
4	1	75	–	20	10	8	–	8	20
	2	–	11	18	12	9	–	10	18
	3	80	–	16	14	10	–	12	16
	4	–	12	14	16	11	–	14	14
	5	85	–	12	18	12	–	16	12
	6	–	13	10	20	13	–	18	10
	7	90	–	8	22	14	–	20	8
	8	–	14	6	24	15	–	22	6
	9	95	–	4	26	16	–	24	4
	10	–	15	5	20	17	–	20	5
5	1	100	–	20	–	10	10	8	–
	2	–	14	19	–	11	9	9	–
	3	90	–	18	–	12	8	10	–
	4	–	13	17	–	13	7	11	–
	5	80	–	16	–	14	6	12	–
	6	–	12	15	–	15	5	13	–
	7	70	–	14	–	16	4	14	–
	8	–	11	13	–	15	5	15	–
	9	60	–	12	–	14	6	16	–
	10	–	10	11	–	13	7	17	–
6	1	50	–	4	4	6	–	6	–
	2	–	9	5	6	7	–	8	–
	3	45	–	6	8	8	–	10	–
	4	–	8	7	10	9	–	12	–
	5	40	–	8	12	10	–	14	–
	6	–	7	9	14	11	–	16	–
	7	35	–	10	16	12	–	18	–
	8	–	6	11	18	13	–	20	–
	9	30	–	12	20	14	–	22	–
	10	–	5	13	22	15	–	24	–
7	1	50	–	10	20	20	10	5	–
	2	–	4,5	11	18	19	12	10	–
	3	45	–	12	16	18	14	15	–
	4	–	4	13	14	17	16	20	–
	5	40	–	14	12	16	18	25	–
	6	–	3,5	15	10	15	20	30	–
	7	35	–	16	8	14	22	35	–
	8	–	3	17	6	13	24	40	–
	9	30	–	18	4	12	26	45	–
	10	–	2,5	19	5	11	25	50	–
8	1	35	–	20	–	10	–	10	20
	2	–	3	19	–	12	–	11	18
	3	40	–	18	–	14	–	12	16

Окончание табл. 5.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	4	–	4	17	–	16	–	13	14
	5	45	–	16	–	18	–	14	12
	6	–	5	15	–	20	–	15	10
	7	50	–	14	–	22	–	16	8
	8	–	6	13	–	24	–	17	6
	9	55	–	12	–	26	–	18	5
	10	–	7	11	–	28	–	19	6
9	1	60	–	10	20	20	–	20	–
	2	–	8	11	18	19	–	21	–
	3	65	–	12	16	18	–	22	–
	4	–	9	13	14	17	–	23	–
	5	70	–	14	12	16	–	24	–
	6	–	10	15	10	15	–	25	–
	7	75	–	16	8	14	–	26	–
	8	–	11	17	6	13	–	27	–
	9	80	–	18	4	12	–	28	–
	10	–	12	19	5	11	–	29	–
10	1	50	–	20	30	10	–	30	10
	2	–	5	19	28	11	–	31	12
	3	45	–	18	26	12	–	32	14
	4	–	4,5	17	24	13	–	33	16
	5	40	–	16	22	14	–	34	18
	6	–	4	15	20	15	–	35	20
	7	35	–	14	18	16	–	36	22
	8	–	3,5	13	16	17	–	37	24
	9	30	–	12	14	18	–	38	26
	10	–	3	11	12	19	–	39	28

5.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету однофазной цепи переменного тока с последовательно-параллельным соединением резисторов, индуктивных катушек и конденсаторов.

Даны численные значения сопротивлений R_1, R_2, X_{L1}, X_{L2}, X_{C1}, X_{C2}. Заданы также входное напряжение U или входной ток I в действующих значениях (табл. 5.1).

Данную задачу можно решать методом проводимостей, поэтому необходимо определить сначала активные проводимости ветвей g_i и всей цепи g, индуктивные проводимости ветвей b_{Li} и всей цепи b_L, емкостные проводимости ветвей b_{Ci} и всей цепи b_C, полную проводимость всей цепи y. Если рассматриваемая ветвь содержит сопротивления какого-либо вида R_i, X_{Li}, X_{Ci}, то проводимости вычисляются по

формулам

$$g_i = \frac{1}{\sum R_i};\quad b_{Li} = \frac{1}{\sum X_{Li}};\quad b_{Ci} = \frac{1}{\sum X_{Ci}}. \tag{5.1}$$

Если рассматриваемая ветвь содержит два и более последовательно соединенных разнотипных элементов, то проводимость *i*-й ветви вычисляется по формулам:

$$g_i = \frac{\sum R_i}{Z_i^2};\quad b_{Li} = \frac{\sum X_{Li}}{Z_i^2};\quad b_{Ci} = \frac{\sum X_{Ci}}{Z_i^2}, \tag{5.2}$$

где Z_i – полное сопротивление *i*-й ветви.

Активная, индуктивная, емкостная проводимости всей цепи вычисляются как сумма одноименных проводимостей:

$$g = \sum g_i;\ b_L = \sum b_{Li};\ b_C = \sum b_{Ci}. \tag{5.3}$$

Полная проводимость всей цепи определяется по формуле

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2}. \tag{5.4}$$

Входной ток *I* определяется по закону Ома:

$$I = Uy. \tag{5.5}$$

Входное напряжение по заданному току вычисляется из формулы (5.5).

Показание ваттметра численно равно значению активной мощности участка цепи в ваттах (Вт) или в киловаттах (кВт) и вычисляется по формуле

$$P = U^2 \cdot \sum g_k, \tag{5.6}$$

где Σg_k – сумма активных проводимостей ветвей, к которым подключен ваттметр, См.

Показание фазометра определяется по формулам

$$\arccos \varphi = \frac{g_k}{y_k};\ \arcsin \varphi = \frac{b_{Lk} - b_{Ck}}{y_k};\ \arctan \varphi = \frac{b_{Lk} - b_{Ck}}{g_k}, \tag{5.7}$$

где g_k – активная проводимость ветвей цепи, к которым подключена катушка напряжения фазометра, См;

b_{Lk}, b_{Ck} – реактивная проводимость ветвей цепи, к которым подключена катушка напряжения фазометра, См;

y_k – полная проводимость данного участка, См.

Векторную диаграмму токов цепи нужно строить следующим образом:

1) записать для данной цепи векторное уравнение токов на основе 1-го закона Кирхгофа:

$$\bar{I} = \bar{I}_{R1} + \bar{I}_{R2} + \bar{I}_{L1} + \bar{I}_{L2} + \bar{I}_{C1} + \bar{I}_{C2}; \qquad (5.8)$$

2) выбрать базовый вектор, относительно которого строится диаграмма токов. В параллельной цепи это, как правило, вектор напряжения $\bar{U}$;

3) учитывать, что векторы $\bar{I}_{Ri}$ совпадают по фазе с вектором напряжения $\bar{U}$, векторы $\bar{I}_{Li}$ отстают от вектора $\bar{U}$ на 90º, а векторы $\bar{I}_{Ci}$ опережают вектор $\bar{U}$ на 90º; кроме того, стоит иметь в виду, что векторные слагаемые формулы (8) подчиняются законам переместительности и сочетательности.

5.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В сеть с переменным синусоидальным напряжением U = 20 В параллельно включены: R_1 = 3 Ом, X_L = 4 Ом, R_2 = 4 Ом, X_C = 3 Ом, R_3 = 4 Ом.

Определить показания электроизмерительных приборов, включенных в цепь (рис. 5.11), и построить векторную диаграмму токов.

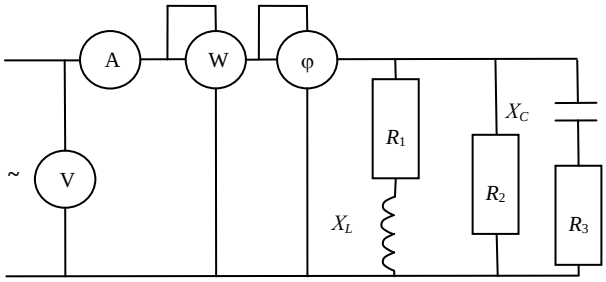


Рис. 5.11. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Решение

1. Активная проводимость первой ветви:

$$g_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{3}{3^2 + 4^2} = \frac{4}{25} = 0{,}12 \text{ См.}$$

2. Индуктивная проводимость первой ветви:

$$b_L = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} = \frac{3}{3^2 + 4^2} = \frac{4}{25} = 0{,}16 \text{ См.}$$

3. Активная проводимость второй ветви:

$$g_2 = \frac{1}{R_2} = \frac{1}{4} = 0{,}25 \text{ См.}$$

4. Емкостная проводимость третьей ветви:

$$b_C = \frac{X_C}{R_3^2 + X_C^2} = \frac{3}{4^2 + 3^2} = \frac{3}{25} = 0{,}12 \text{ См.}$$

5. Активная проводимость третьей ветви:

$$g_3 = \frac{R_3}{R_3^2 + X_C^2} = \frac{4}{4^2 + 3^2} = \frac{4}{25} = 0{,}16 \text{ См.}$$

6. Активная проводимость всей цепи:

$$g = g_1 + g_2 + g_3 = 0{,}12 + 0{,}25 + 0{,}16 = 0{,}53 \text{ См.}$$

7. Индуктивная проводимость всей цепи:

$$b_L = 0{,}16 \text{ См.}$$

8. Емкостная проводимость всей цепи:

$$b_C = 0{,}12 \text{ См.}$$

9. Полная проводимость всей цепи:

$$y = \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2} = \sqrt{(0{,}53)^2 + (0{,}16 - 0{,}12)^2} = 0{,}532 \text{ См.}$$

10. Показание амперметра:

$$I = U\cdot(g_1 + g_2 + g_3) = 20\cdot(0{,}12 + 0{,}25 + 0{,}16) = 10{,}63 \text{ А}.$$

11. Показание ваттметра:

$$P = U^2\cdot(g_1 + g_2 + g_3) = 20\cdot(0{,}12 + 0{,}25 + 0{,}16) = 212 \text{ Вт}.$$

12. Показание фазометра:

$$\varphi = \operatorname{arctg}\frac{b_L - b_C}{g} = \operatorname{arctg}\frac{0{,}16 - 0{,}12}{0{,}53} = 4°1'9''.$$

13. Для построения векторной диаграммы выберем в качестве оси вектор напряжения $\bar{U}$, масштаб векторов токов $\mu_I = 2$ А/см и вычислим составляющие общего тока:

$$I_{R1} = U\cdot g_1 = 20\cdot 0{,}12 = 2{,}4 \text{ А};$$
$$I_{R2} = U\cdot g_2 = 20\cdot 0{,}25 = 5 \text{ А};$$
$$I_{R3} = U\cdot g_3 = 20\cdot 0{,}16 = 3{,}2 \text{ А};$$
$$I_{X_L} = U\cdot b_L = 20\cdot 0{,}16 = 3{,}2 \text{ А};$$
$$I_{X_C} = U\cdot b_C = 20\cdot 0{,}12 = 2{,}4 \text{ А}.$$

Векторная диаграмма в выбранном масштабе построена на рис. 5.12.

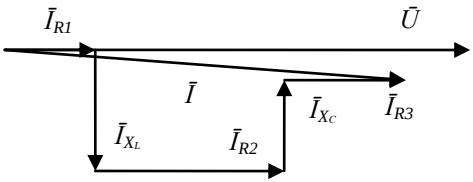


Рис. 5.12. Векторная диаграмма

Векторы $\bar{I}_{R1}$, $\bar{I}_{R2}$, $\bar{I}_{R3}$ совпадают по фазе с вектором напряжения $\bar{U}$, вектор $\bar{I}_{X_L}$ отстает, а вектор $\bar{I}_{X_C}$ опережает вектор $\bar{U}$ на четверть периода или 90°. Вектор общего тока $\bar{I}$ равен геометрической сумме составляющих векторов токов.

Лабораторная работа № 6.
ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ С ОДНОФАЗНЫМИ ПРИЕМНИКАМИ, СОЕДИНЕННЫМИ СПОСОБОМ «ЗВЕЗДА»

Цели работы: 1. Изучить соединение однофазных приемников (ламп накаливания) способом «звезда», особенности этого способа и основные соотношения между линейными и фазными величинами (напряжениями и токами).

2. Исследовать четырехпроходную и трехпроходную схемы соединения однофазных приемников при симметричных и несимметричных режимах работы.

6.1. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, в которой объектом исследования являются лампы накаливания *EL*1…*EL*6, соединенные способом «звезда» монтажными проводами. Номинальные характеристики лампы накаливания: мощность $P_{\text{Н}} = 100$ Вт, напряжение $U_{\text{Н}} = 220$ В.

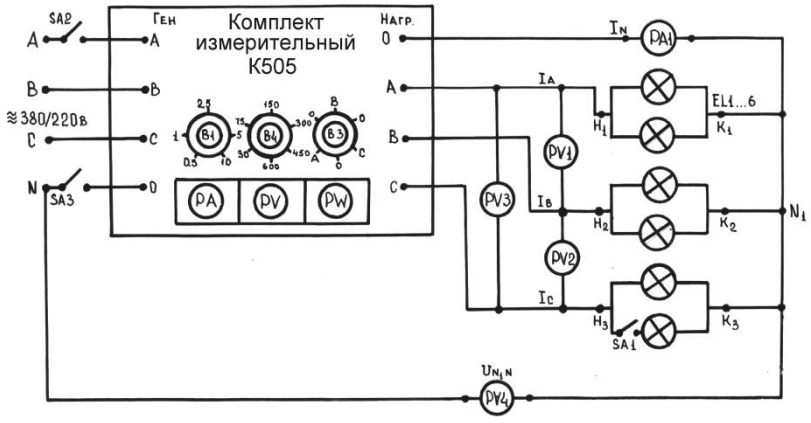


Рис. 6.1. Принципиальная электрическая схема испытания трехфазной цепи с однофазными потребителями, соединенными способом «звезда»

Средствами исследования служат электроизмерительные приборы:

вольтметры *PV*1…*PV*4, амперметр *PA*1 (рис. 6.1). Вольтметры – приборы электромагнитной системы, номинальное напряжение каждого из них $U_{Н}$ = 75…600 В. Амперметр – прибор электромагнитной системы типа Э59 с пределами измерений по току $I_{Н}$ = 0,25; 0,5; 1 А. Комплект измерительный типа К505 имеет встроенные приборы: вольтметр *PV*, амперметр *PA*, ваттметр *PW*, которые имеют следующие пределы измерения по току $I_{Н}$ = 0,5…10 А, по напряжению $U_{Н}$ = 60…600 В, по активной мощности $P_{Н}$ = 0,015…6 кВт.

Для получения требуемых режимов исследования на лабораторной установке имеются три однофазных однополюсных выключателя: *SA*1, *SA*2 и *SA*3.

Выключатель *SA*1 служит для отключения одной из ламп накаливания в фазе *A* (несимметричный режим), выключатель *SA*2 – для размыкания линейного провода *A* (обрыв фазы *A*), выключатель *SA*3 – для размыкания нейтрального провода NN_1 (трехпроводная цепь).

На панели измерительного комплекта К505 имеются переключатели фаз *B*3 для проведения измерений в соответствующей фазе (*A*, *B* или *C*), пределов номинального тока *B*1 и пределов номинального напряжения *B*4.

6.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРЕХФАЗНЫХ ЦЕПЯХ

Однофазная система неэкономична вследствие несовершенства однофазных электрических машин. Так, например, при одинаковых габаритах, массе активных материалов (стали и меди) и потерях энергии мощность однофазной машины в 1,5 раза меньше мощности трехфазной машины. Поэтому для электрификации используется трехфазная система переменного тока.

Трехфазной системой переменного тока, или просто трехфазной системой, называется цепь или сеть переменного тока, в которой действуют три ЭДС одинаковой частоты, но взаимно смещенные по фазе на одну треть периода. Отдельные цепи, составляющие трехфазную систему, называются фазами.

Если ЭДС во всех трех фазах имеют одинаковую амплитуду и сдвинуты по фазе на одинаковый угол, то такая система называется симметричной.

Обмотки трехфазного генератора соединяют между собой в «звезду» или «треугольник».

При соединении обмоток генератора «звездой» (рис. 6.2, *а*) концы

всех трех фаз соединяют в общую точку *O*, а к началам подсоединяют провода, отводящие энергию в сеть. Эти три провода называются линейными, а напряжение между любыми двумя линейными проводами – линейным напряжением $U_л$. От общей точки соединения концов трех фаз (от нулевой точки «звезды») может быть отведен четвертый провод, называемый нулевым. Напряжение между любым из трех линейных проводов и нулевым проводом равно напряжению между началом и концом одной фазы, т.е. фазному напряжению $U_ф$.

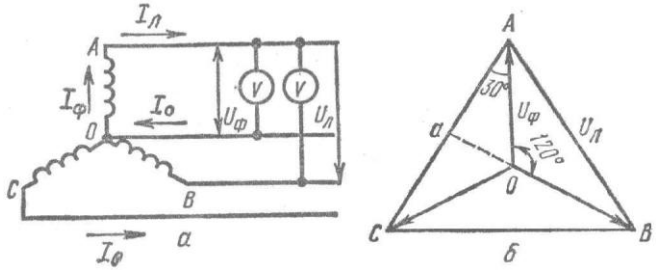


Рис. 6.2. Схемы соединения обмоток трехфазного генератора:
а – соединение «звездой»; *б* – векторные диаграммы напряжений

Обычно все фазы обмотки генератора выполняются одинаковыми, так что действующие значения ЭДС в фазах равны, т.е. $E_A = E_B = E_C$. Если в цепь каждой фазы генератора включить нагрузку, то по этим цепям будут проходить токи. В случае одинакового по величине и характеру сопротивления всех трех фаз приемника, т.е. при равномерной нагрузке, токи в фазах будут равны по величине и сдвинуты по фазе относительно своих напряжений на один и тот же угол φ. Как максимальные, так и действующие значения фазных напряжений при равномерной нагрузке равны, т.е. $U_A = U_B = U_C$. Эти напряжения сдвинуты по фазе на 120º, как показано на векторной диаграмме (рис. 6.2, *б*). Напряжения между любыми точками схемы соответствуют векторам между теми же точками. Так, например, напряжение между точками *A* и *O* схемы (фазное напряжение U_A) соответствует вектору *A–O* диаграммы, а напряжение между линейными проводами *A* и *B* схемы – вектору линейного напряжения *A–B* диаграммы. По векторной диаграмме легко установить соотношение между линейным и фазным напряжениями. Из треугольника *AOA* можно записать следующее соотношение:

$$1/2U_л = U_ф \cos 30^\circ = U_ф \sqrt{3}/2, \qquad (6.1)$$

откуда

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}, \text{ или } U_{\text{ф}} = U_{\text{ф}} / \sqrt{3}, \tag{6.2}$$

т.е. при соединении обмоток симметричного генератора «звездой» линейное напряжение в 1,73 раза больше фазного.

Из схемы (рис. 6.2, *а*) видно, что при соединении обмоток генератора «звездой» сила тока в линейном проводе равна силе тока в фазах генератора, т.е. $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

На основании первого закона Кирхгофа сила тока в нулевом проводе равна геометрической сумме силы токов в фазах генератора:

$$\overrightarrow{I_0} = \overrightarrow{I_{\text{A}}} + \overrightarrow{I_{\text{B}}} + \overrightarrow{I_{\text{C}}}. \tag{6.3}$$

При равномерной нагрузке токи в фазах генератора равны между собой и сдвинуты по фазе на одну треть периода. Геометрическая сумма силы токов трех фаз в таком случае равна нулю, т.е. в нулевом проводе тока не будет.

При соединении обмоток генератора «треугольником» (рис. 6.3, *а*) начало каждой фазы соединяется с концом другой фазы. Таким образом, три фазы генератора образуют замкнутый контур. Так как ЭДС в фазах генератора равны и сдвинуты на одну треть периода по фазе, то геометрически их сумма равна нулю и, следовательно, в замкнутом контуре трехфазной системы, соединенной «треугольником», никакого тока при отсутствии внешней нагрузки не будет.

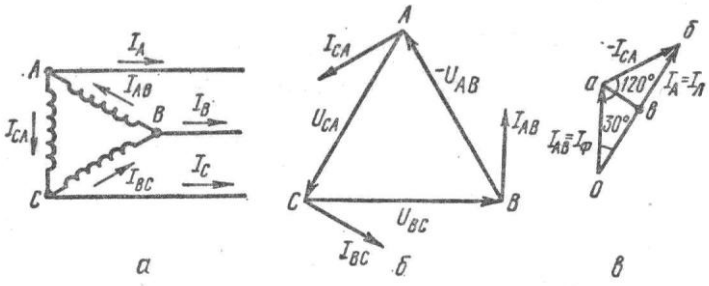


Рис. 6.3. Схема соединения обмоток генератора «треугольником» (*а*), векторные диаграммы напряжений и токов в фазах (*б*) и векторная диаграмма фазных и линейных токов (*в*)

Линейные провода при соединении «треугольником» подключают-

ся к точкам соединения начала одной фазы и конца другой. Напряжение между линейными проводами равно напряжению между началом и концом одной фазы. Таким образом, при соединении обмоток генератора «треугольником» линейное напряжение равно фазному, т.е. $U_л = U_ф$.

При равномерной нагрузке в фазах обмоток генератора проходят токи равной силы, сдвинутые относительно фазных напряжений на одинаковые углы φ, т.е. $I_{AB} = I_{BC} = I_{CA}$.

Векторная диаграмма фазных напряжений и токов изображена на рис. 6.3, *б*. Приняв направление фазных и линейных токов за положительное, которое указано на рис. 6.3, *а*, на основании первого закона Кирхгофа для мгновенных значений токов можно записать следующие выражения:

$$I_A = I_{AB} - I_{CA};\ I_B = I_{BC} - I_{AB};\ I_C = I_{CA} - I_{BC}. \qquad (6.4)$$

Так как токи синусоидальны, заменим алгебраическое вычитание мгновенных значений токов геометрическим вычитанием векторов, изображающих действующие значения токов:

$$\overrightarrow{I_A} = \overrightarrow{I_{AB}} - \overrightarrow{I_{CA}};\ \overrightarrow{I_B} = \overrightarrow{I_{BC}} - \overrightarrow{I_{AB}};\ \overrightarrow{I_C} = \overrightarrow{I_{CA}} - \overrightarrow{I_{BC}}. \qquad (6.5)$$

Ток I_A линейного провода *A* определяется геометрической разностью векторов фазных токов $\bar{I}_{AB}$ и $\bar{I}_{CA}$.

Для построения вектора линейного тока $\bar{I}_A$ изобразим вектор фазного тока $\bar{I}_{AB}$ (рис. 6.3, *в*) в виде отрезка *Oa*, а из точки *a* построим вектор $-\bar{I}_{CA}$ (отрезок *аб*), равный и противоположно направленный вектору $\bar{I}_{CA}$ (см. рис. 6.3, *б*). Вектор, соединяющий начало вектора $\bar{I}_{AB}$ (точка *O*) с концом вектора $-\bar{I}_{CA}$ (точка *б*), является вектором линейного тока $\bar{I}_A$.

Аналогично могут быть построены векторы линейных токов $\bar{I}_B$ и $\bar{I}_C$.

Из векторной диаграммы, показанной на рис. 6.3, *в*, легко определить соотношение между линейными и фазными токами при соединении обмоток генератора в «треугольник». Из треугольника *0ав* можно записать:

$$1/2\, I_л = I_ф \cos 30^\circ = I_ф \sqrt{3}/2, \qquad (6.6)$$

откуда $I_л = 1{,}73 I_ф$, т.е. при соединении обмоток генератора в «треугольник» линейный ток в 1,73 раза больше фазного (при равномерной нагрузке).

Несимметричная нагрузка включается в трехфазную сеть «звездой»

с нулевым проводом. При этом каждая фаза трехфазной цепи независима от других фаз. Напряжения на фазных нагрузках всех трех фаз одинаковы, несмотря на разные величины фазных нагрузок. Изменение фазной нагрузки одной фазы вызывает изменение силы тока в данной фазе, которая влияет на силу тока только в нулевом проводе и не влияет на силу тока в других фазах. Для того чтобы нулевой провод не мог отключаться, на нем не ставят предохранителей. Несимметричной нагрузкой трехфазной цепи является нагрузка источников освещения и приемников бытового обслуживания (электроплиты, холодильники, телевизоры и т.д.).

Несимметричную нагрузку нельзя подключать в трехфазную сеть «звездой» без нулевого провода. Если это сделать, произойдет перераспределение напряжений по фазам. На фазах, имеющих большее сопротивление, напряжение будет больше номинального фазного напряжения, и приемники перегреются и даже могут сгореть. На фазах, имеющих меньшее сопротивление, напряжение будет меньше номинального, и приемники получат меньшую мощность.

Например, в трехфазной сети с линейным напряжением 380 В при подключении приемников «звездой» без нулевого провода в фазе *B* включена одна лампа, в фазе *C* – девять таких же ламп, а фаза *A* не имеет приемника, что соответствует ее обрыву. При этом приемники фаз *B* и *C* окажутся подключенными последовательно к линейному напряжению сети, которое распределится по фазам прямо пропорционально сопротивлениям. Следовательно, приемник фазы *B* будет под напряжением 342 В (380 – 380 · 1/10), а приемник фазы *C* – под напряжением 38 В при номинальном фазном напряжении 220 В (380 – 380 · 9/10).

При равенстве фазных сопротивлений фазы *B* и *C* окажутся под следующими фазными напряжениями: $U'_B = U'_C = 190$ В; $U'_A = 328{,}7$ В (рис. 6.4, *а*).

При несимметричной нагрузке трехфазной сети без нулевого провода потенциал узловой точки O' нагрузки не равен потенциалу узловой точки *O* фаз генератора, т.е. произойдет смещение нейтрали и возникнет напряжение смещения нейтрали U_N.

По закону Ома для каждой фазы цепи имеем:

$$\left.\begin{aligned} U_N &= E_A - I_A Z_A, \\ U_N &= E_B - I_B Z_B, \\ U_N &= E_C - I_C Z_C, \end{aligned}\right\} \qquad (6.7)$$

где роль ЭДС играют фазные напряжения генератора U_A, U_B, U_C (в симметричной системе равные по величине и сдвинутые по фазе на 120º), а $I_AZ_A = U'_A$; $I_BZ_B = U'_B$; $I_CZ_C = U'_C$ есть падение напряжения на фазных нагрузках. Следовательно, фазные напряжения нагрузки выразятся уравнениями: $U'_A = U_A - U_N$; $U'_B = U_B - U_N$; $U'_C = U_C - U_N$.

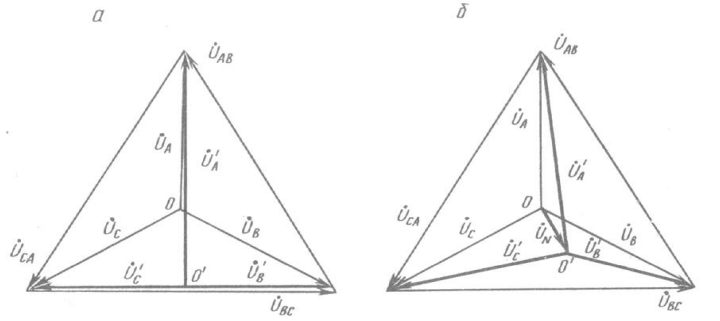


Рис. 6.4. Векторные диаграммы линейных и фазных напряжений при несимметричной нагрузке трехфазной цепи без нулевого провода

Топографическая диаграмма фазных и линейных напряжений будет иметь вид, показанный на рис. 6.4, *б*. Для определения напряжения смещения нейтрали U_N воспользуемся равенством (6.7) и запишем его в следующем виде:

$$\left.\begin{aligned} I_A &= (E_A - U_N)/Z_A = (U_A - U_N)Y_A, \\ I_B &= (E_B - U_N)/Z_B = (U_B - U_N)Y_B, \\ I_C &= (E_C - U_N)/Z_C = (U_C - U_N)Y_C, \end{aligned}\right\}$$

где Y_A, Y_B, Y_C – комплексные проводимости фазных нагрузок.

Так как для симметричной трехфазной сети без нулевого провода $I_A + I_B + I_C = 0$, то $(U_A - U_N)Y_A + (U_B - U_N)Y_B + (U_C - U_N)Y_C = 0$, откуда

$$U_N = \frac{U_AY_A + U_BY_B + U_CY_C}{Y_A + Y_B + Y_C}. \qquad (6.8)$$

Определив напряжение смещения нейтрали U_N по формуле (6.8), можно найти фазные токи при неравномерной нагрузке.

6.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципиальной электрической схемой лабораторной установки (рис. 6.1) и табл. 6.1 для записи результатов исследования трехфазной цепи.

Таблица 6.1. **Результаты исследования трехфазной цепи однофазных потребителей, соединенных способом «звезда»**

Измеряемые и вычисляемые величины	Режим работы					
	четырехпроводной цепи			трехпроводной цепи		
	1. Симметричный режим	2. Несимметричный режим	3. Обрыв фазного провода	4. Симметричный режим	5. Несимметричный режим	6. Обрыв фазного провода
U_{AB}, В						
U_{BC}, В						
U_{CA}, В						
U_A, В						
U_B, В						
U_C, В						
U_N, В						
I_A, А						
I_B, А						
I_C, А						
I_N, А						
P_A, Вт						
P_B, Вт						
P_C, Вт						
$\Sigma P_ф$, Вт						

2. Собрать цепь с помощью монтажных проводов и подсоединить ее к силовому настенному щитку с напряжениями $U_{1л} / U_{1ф}$ = 380/220 В, частотой 50 Гц. На измерительном комплекте К505 установить переключатель фаз в положение «0», переключатель токов $B1$ – в положение «1А», переключатель вольтметра $B4$ – в положение «300 В», пере-

ключатель *B*2 – в положение «Без тр. 2». Клемму заземления комплекта К505 необходимо соединить с клеммой *N* настенного щитка.

3. Для проведения исследования первого режима работы четырехпроводной трехфазной цепи (симметричная нагрузка) выключатели *SA*1...*SA*3 установить в положение «Вкл.». Получив разрешение преподавателя, включить установку в сеть и произвести необходимые измерения. Линейные напряжения U_{AB}, U_{BC}, U_{CA} измеряются вольтметрами *PV*1, *PV*2, *PV*3 соответственно, сила тока в нейтральном проводе I_N – амперметром *PA*1, напряжение смещения нейтрали U_N – вольтметром *PV*4. Фазные величины – напряжение U_A, силу тока I_A и активную мощность P_A – измеряют приборами *PV, PA, PW* комплекта К505 в положении «*A*» переключателя *B*3; напряжение U_B, активную мощность P_B, силу тока I_B – в положении «*B*» переключателя *B*3; напряжение U_C, силу тока I_C, активную мощность P_C – в положении «*C*» переключателя *B*3. Результаты измерений занести в табл. 6.1, режим 1.

4. Выключатель *SA*1 установить в положение «Выкл.», создавая тем самым несимметричный режим работы трехфазной цепи (в фазе *C* включенной остается одна лампа накаливания). Данные измерений записать в табл. 6.1, режим 2.

5. Выключатель *SA*1 установить в положение «Вкл.», выключатель *SA*2 – в положение «Выкл.», создавая тем самым режим обрыва линейного провода *A*. Данные измерений записать в табл. 6.1, режим 3.

6. Выключатели *SA*1 и *SA*2 установить в положение «Вкл.», выключатель *SA*3 нейтрального провода – в положение «Выкл.», создавая тем самым трехпроводную трехфазную цепь. Повторить измерения для режимов аналогично выполненным в п. 3, 4 и 5. Занести полученные данные в табл. 6.1, режимы 4, 5 и 6 соответственно.

7. По данным опытов для каждого из режимов построить топографические векторные диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов для каждого из исследованных режимов. Рассчитать суммарную активную мощность трех фаз во всех режимах.

6.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [1, 2, 4, 5].

2. Ознакомиться со схемами соединения однофазных приемников способом «звезда» с соответствующими измерительными приборами.

Записать формулы, необходимые для расчета суммарной активной

мощности.

3. Рассмотреть решение задач, обратив особое внимание на построение векторных топографических диаграмм напряжений и векторных диаграмм токов.

6.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Действительные значения измеряемой силы тока I в амперах, напряжения U в вольтах, мощности P в ваттах необходимо определять по следующим формулам:

$$I = c_I \cdot m_I; \qquad U = c_U \cdot m_U; \qquad P = c_P \cdot m_P, \tag{6.9}$$

где c_I, c_U, c_P – цены делений измерительных приборов амперметра, вольтметра, ваттметра;

m_I, m_U, m_P – отсчет по шкале в делениях соответствующего прибора.

2. Активная мощность в трехфазной цепи определяется по формуле

$$P = P_A + P_B + P_C = \sum_{1}^{3} P_{\Phi}, \tag{6.10}$$

где P_A, P_B, P_C – активные мощности фаз A, B, C соответственно, измеренные ваттметром PW измерительного комплекта К505.

3. При построении топографической векторной диаграммы напряжений и векторной диаграммы токов необходимо руководствоваться следующими правилами.

Сначала необходимо записать для данной трехфазной цепи векторное уравнение токов (по первому закону Кирхгофа) и три векторных уравнения напряжений (по второму закону Кирхгофа):

$$\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = \vec{I}_N; \tag{6.11}$$

$$\begin{cases} \vec{U}_{AB} = \vec{U}_{AN} - \vec{U}_{BN}, \\ \vec{U}_{BC} = \vec{U}_{BN} - \vec{U}_{CN}, \\ \vec{U}_{CA} = \vec{U}_{CN} - \vec{U}_{AN}, \end{cases} \tag{6.12}$$

где A, B, C, N – буквы, обозначающие вершины и центр треугольника, образуемого векторами напряжений.

Построение диаграммы напряжений нужно начинать с построения в соответствующем масштабе симметричной трехлучевой звезды векторов фазных напряжений $\bar{U}_{AN}$, $\bar{U}_{BN}$, $\bar{U}_{CN}$ Фазовые углы между векторами равны между собой и составляют по 120°, начала всех векторов находятся в точке N. Линейные напряжения $\bar{U}_{AB}$, $\bar{U}_{BC}$, $\bar{U}_{CA}$ строятся на основании формулы (6.12) как векторные разности соответствующих фазных напряжений.

Векторы линейных (фазных) токов $\bar{I}_A$, $\bar{I}_B$, $\bar{I}_C$ откладываются относительно векторов одноименных фазных напряжений под соответствующими фазовыми углами.

Для исследуемых в работе ламп накаливания векторы токов параллельны (соответствующий фазовый угол равен нулю) одноименным векторам фазных напряжений. Вектор тока $\bar{I}_N$ в нейтральном проводе определяется по формуле (6.11) как геометрическая сумма векторов фазных токов.

4. Для наиболее подготовленных студентов определить коэффициент неравномерности нагрузки фаз при несимметричном режиме работы цепи (табл. 6.1, режим 2):

$$k_{\text{н}} = \frac{3\cdot\left(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2\right)}{\left(I_A + I_B + I_C\right)^2}\cdot\left(1+\frac{1,5R_N}{R_N}\right) - \frac{1,5R_N}{R_{\text{ф}}}, \qquad (6.13)$$

где R_N – сопротивление нейтрального провода, Ом;

$R_{\text{ф}}$ – сопротивление фазного провода цепи, Ом.

Можно принять соотношение $R_N / R_{\text{ф}} = 2$.

6.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Указать недостатки трехпроводной трехфазной цепи и преимущества четырехпроводной цепи.

2. Каково назначение нейтрального провода? Можно ли обойтись без этого провода при работе однофазных потребителей (трехфазных потребителей)?

3. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями при соединении однофазных потребителей способом «звезда»? Как изменяются эти соотношения в зависимости от режима работы цепи?

4. Что такое напряжение смещения нейтрали U_N и как можно его определить? Может ли это напряжение являться причиной электротравматизма человека или животных?

6.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Записать название и цели лабораторной работы.

2. Привести характеристику объекта и средств исследования (п. 6.1).

3. Вычертить принципиальную электрическую схему испытания трехфазной цепи с однофазными потребителями, соединенными способом «звезда» (см. рис. 6.1).

4. Результаты исследований записать в табл. 6.1.

5. Построить векторную диаграмму напряжений и токов при режиме работы цепи, указанном преподавателем (рис. 6.5–6.7).

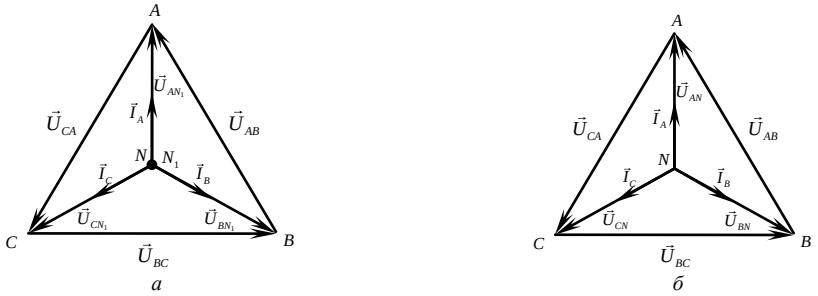


Рис. 6.5. Образцы построения векторных диаграмм при симметричном режиме для четырехпроводной (*а*) и трехпроводной (*б*) цепей

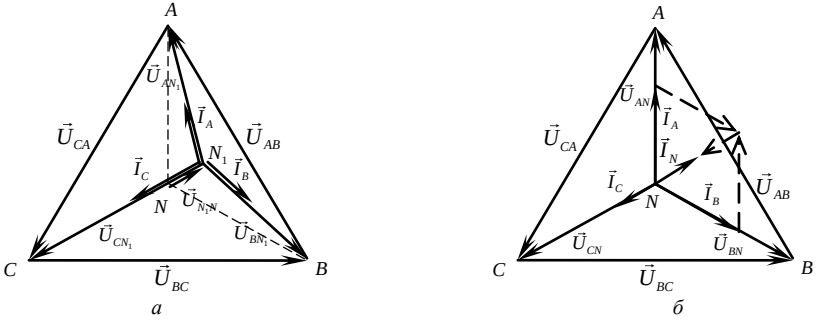


Рис. 6.6. Образцы построения векторных диаграмм при несимметричном режиме для четырехпроводной (*а*) и трехпроводной (*б*) цепей

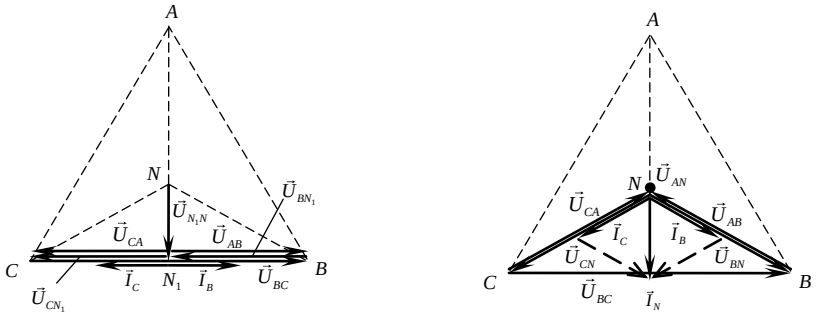


Рис. 6.7. Образцы построения векторных диаграмм при обрыве фазы *A* для четырехпроводной (*а*) и трехпроводной (*б*) цепей

Лабораторная работа № 7.
РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ

Цели работы: 1. Изучение основных соотношений, возникающих в трехфазных электрических цепях с приемниками, соединенными способом «звезда».

2. Получение практических навыков расчета трехфазных электрических цепей с приемниками, соединенными способом «звезда».

7.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Однофазные токоприемники соединены способом «звезда» и включены в трехфазную сеть с линейным напряжением *U*. Тип сопротивлений, их численное значение, а также линейное напряжение *U* заданы в табл. 1. Приемники фаз *A*, *B*, *C* соединены последовательно или параллельно согласно принципиальным электрическим схемам (рис. 7.1–7.10).

Требуется:

1) определить силу токов I_A, I_B, I_C в фазах токоприемников *A*, *B*, *C*;

2) определить активную, реактивную, полную мощность каждой фазы в отдельности, а также активную, реактивную и полную мощность всех трех фаз;

3) построить векторную диаграмму токов и напряжений и графически определить силу тока I_N в нейтральном проводе.

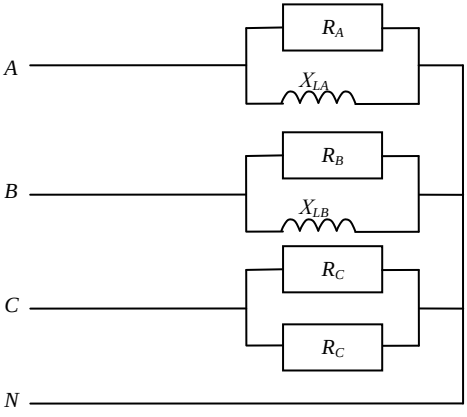


Рис. 7.1. Схема № 1

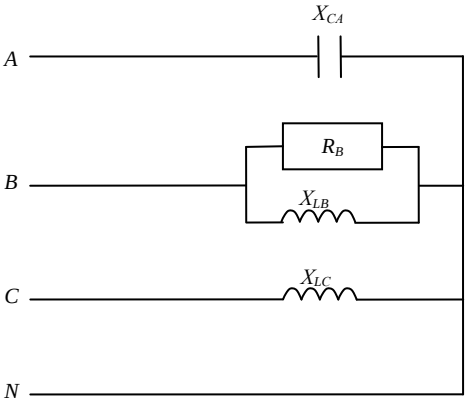


Рис. 7.2. Схема № 2

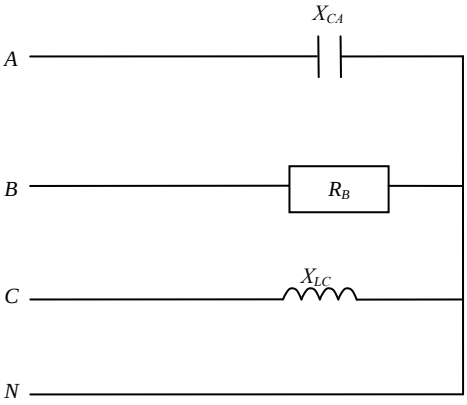


Рис. 7.3. Схема № 3

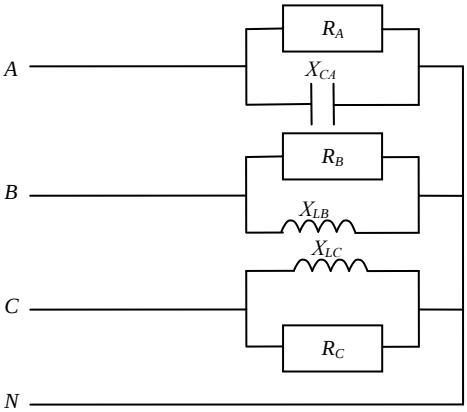


Рис. 7.4. Схема № 4

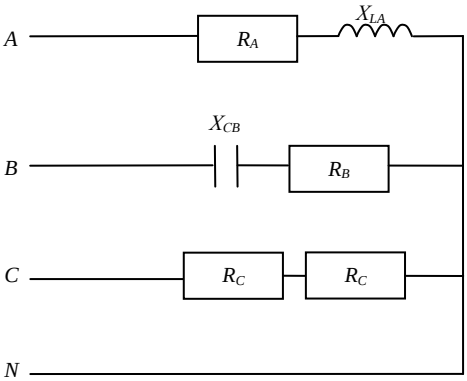


Рис. 7.5. Схема № 5

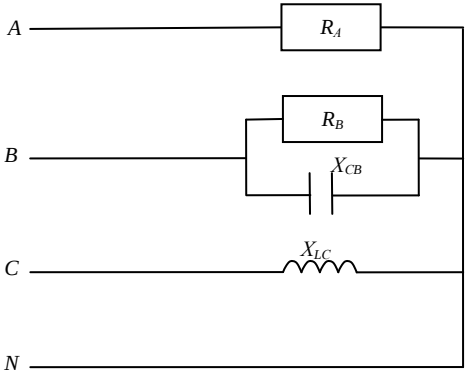


Рис. 7.6. Схема № 6

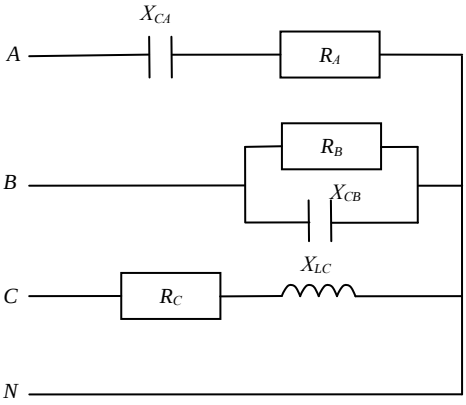


Рис. 7.7. Схема № 7

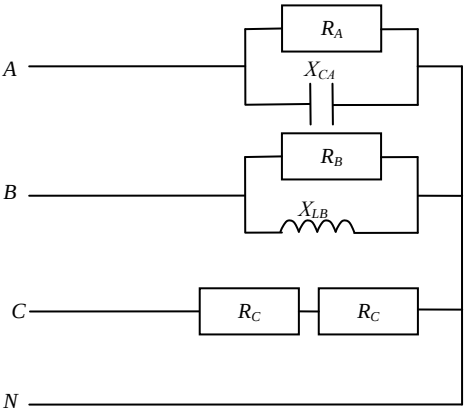


Рис. 7.8. Схема № 8

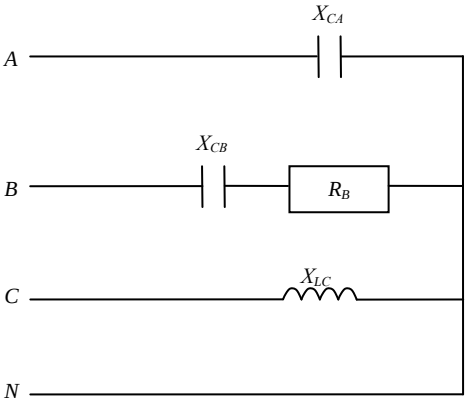


Рис. 7.9. Схема № 9

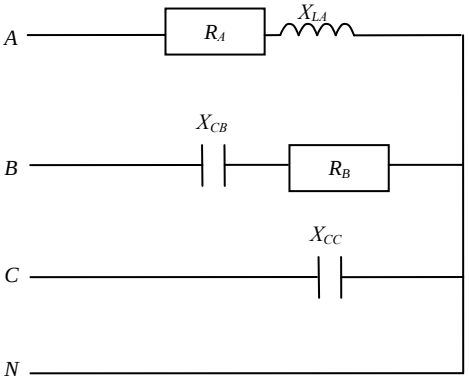


Рис. 7.10. Схема № 10

Таблица 7.1. **Исходные данные**

Варианты		Данные для расчета									
Номер схемы	Строка	$U_Л$	R_A	R_B	R_C	X_{LA}	X_{LB}	X_{LC}	X_{CA}	X_{CB}	X_{CC}
		В	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом	Ом
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	150	10	30	50	20	15	–	–	–	–
	2	160	12	31	49	22	18	–	–	–	–

Продолжение табл. 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	3	170	14	32	48	24	21	–	–	–	–
	4	180	16	33	47	26	24	–	–	–	–
	5	190	18	34	46	28	27	–	–	–	–
	6	200	20	35	45	30	30	–	–	–	–
	7	210	22	36	44	32	33	–	–	–	–
	8	220	24	37	43	34	36	–	–	–	–
	9	230	26	38	42	36	39	–	–	–	–
	10	240	28	39	41	38	42	–	–	–	–
2	1	250	–	40	–	–	45	30	20	–	–
	2	260	–	41	–	–	48	31	22	–	–
	3	270	–	42	–	–	51	32	24	–	–
	4	280	–	43	–	–	54	33	26	–	–
	5	290	–	44	–	–	57	34	28	–	–
	6	300	–	45	–	–	60	35	30	–	–
	7	310	–	46	–	–	63	36	32	–	–
	8	320	–	47	–	–	66	37	34	–	–
	9	330	–	48	–	–	69	38	36	–	–
	10	340	–	49	–	–	72	39	38	–	–
3	1	350	–	50	–	–	–	40	40	–	–
	2	360	–	51	–	–	–	41	42	–	–
	3	370	–	52	–	–	–	42	44	–	–
	4	380	–	53	–	–	–	43	46	–	–
	5	390	–	54	–	–	–	44	48	–	–
	6	400	–	55	–	–	–	45	50	–	–
	7	410	–	56	–	–	–	46	52	–	–
	8	420	–	57	–	–	–	47	54	–	–
	9	430	–	58	–	–	–	48	56	–	–
	10	440	–	59	–	–	–	49	58	–	–
4	1	450	30	60	40	–	75	50	60	–	–
	2	460	32	61	39	–	78	51	62	–	–
	3	470	34	62	38	–	81	52	64	–	–
	4	480	36	63	37	–	84	53	66	–	–
	5	490	38	64	36	–	87	54	68	–	–
	6	500	40	65	35	–	90	55	70	–	–
	7	510	42	66	34	–	93	56	72	–	–
	8	520	44	67	33	–	96	57	74	–	–
	9	530	46	68	32	–	99	58	76	–	–
	10	540	48	69	31	–	102	59	78	–	–
5	1	550	50	70	30	40	–	–	–	20	–
	2	560	52	71	29	42	–	–	–	21	–
	3	570	54	72	28	44	–	–	–	22	–
	4	580	56	73	27	46	–	–	–	23	–
	5	590	58	74	26	48	–	–	–	24	–
	6	600	60	75	25	50	–	–	–	25	–

Продолжение табл. 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
5	7	610	62	76	24	52	–	–	–	26	–
	8	620	64	77	23	54	–	–	–	27	–
	9	630	66	78	22	56	–	–	–	28	–
	10	640	68	79	21	58	–	–	–	29	–
6	1	630	66	78	–	–	–	58	–	28	–
	2	620	64	77	–	–	–	57	–	27	–
	3	610	62	76	–	–	–	56	–	26	–
	4	600	60	75	–	–	–	55	–	25	–
	5	590	58	74	–	–	–	54	–	24	–
	6	580	56	73	–	–	–	53	–	23	–
	7	570	54	72	–	–	–	52	–	22	–
	8	560	52	71	–	–	–	51	–	21	–
	9	550	50	70	–	–	–	50	–	20	–
	10	540	48	69	–	–	–	49	–	19	–
7	1	530	46	68	20	–	–	48	76	18	–
	2	520	44	67	19	–	–	47	74	17	–
	3	510	42	66	18	–	–	46	72	16	–
	4	500	40	65	17	–	–	45	70	15	–
	5	490	38	64	16	–	–	44	68	14	–
	6	480	36	63	15	–	–	43	66	13	–
	7	470	34	62	14	–	–	42	64	12	–
	8	460	32	61	13	–	–	41	62	11	–
	9	450	30	60	12	–	–	40	60	10	–
	10	440	28	59	11	–	–	39	58	9	–
8	1	430	26	58	10	–	99	–	56	–	–
	2	420	24	57	9	–	96	–	54	–	–
	3	410	22	56	8	–	93	–	52	–	–
	4	400	20	55	7	–	90	–	50	–	–
	5	390	18	54	6	–	87	–	48	–	–
	6	380	16	53	5	–	84	–	46	–	–
	7	370	14	52	4	–	81	–	44	–	–
	8	360	12	51	3	–	78	–	42	–	–
	9	350	10	50	2	–	75	–	40	–	–
	10	340	8	49	2	–	72	–	38	–	–
9	1	330	–	48	–	–	–	38	36	8	–
	2	320	–	47	–	–	–	37	34	7	–
	3	310	–	46	–	–	–	36	32	6	–
	4	300	–	45	–	–	–	35	30	5	–
	5	290	–	44	–	–	–	34	28	4	–
	6	280	–	43	–	–	–	33	26	3	–
	7	270	–	42	–	–	–	32	24	2	–
	8	260	–	41	–	–	–	31	22	1	–
	9	250	–	40	–	–	–	30	20	2	–
	10	240	–	39	–	–	–	29	18	3	–

Окончание табл. 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
10	1	230	7	38	–	56	–	–	–	4	20
	2	220	6	37	–	54	–	–	–	5	19
	3	210	5	36	–	52	–	–	–	6	18
	4	200	4	35	–	50	–	–	–	7	17
	5	190	3	34	–	48	–	–	–	8	16
	6	180	2	33	–	46	–	–	–	9	15
	7	170	1	32	–	44	–	–	–	10	14
	8	160	2	31	–	42	–	–	–	11	13
	9	150	3	30	–	40	–	–	–	12	12
	10	140	4	29	–	38	–	–	–	13	11

7.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету трехфазных цепей переменного тока, в которых потребители соединены способом «звезда».

Дана трехфазная четырехпроводная несимметричная цепь с последовательно или параллельно соединенными элементами (активными и реактивными). Задано входное линейное напряжение.

Для определения фазного тока I_A, I_B, I_C необходимо найти полное сопротивление фазы Z_i, если элементы соединены последовательно, или полную проводимость фазы y_i, если элементы соединены параллельно. Тогда токи определяются по формулам

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B}; \; I_C = \frac{U_C}{Z_C}, \tag{7.1}$$

или

$$I_A = U_A \cdot y_A; I_B = U_B \cdot y_B; I_C = U_C \cdot y_C, \tag{7.2}$$

где U_A, U_B, U_C – фазное напряжение цепи, В;

Z_A, Z_B, Z_C – полные сопротивления фаз, Ом;

y_A, y_B, y_C – полные проводимости фаз, См.

Активная мощность фазы P_i в случае последовательно или параллельно соединенных элементов вычисляется по формулам

$$P_i = I_i^2 (\sum R_i), \tag{7.3}$$

или

$$P_i = U_i^2 \cdot g_i\,, \tag{7.4}$$

где ΣR_i – сумма активных сопротивлений фазы, Ом;

g_i – активная проводимость фазы, См.

Индуктивная мощность фазы Q_{Li} и емкостная мощность фазы Q_{Ci} определяются аналогично, только нужно подставлять вместо R_i и g_i соответственно X_{Li}, X_{Ci}, b_{Li}, b_{Ci}.

Полная мощность фазы S_i вычисляется по формуле (7.5), исключая при этом ненужные слагаемые:

$$S_i = \sqrt{P_i^2 + \left(Q_{Li} - Q_{Ci}\right)^2}\,. \tag{7.5}$$

Активная мощность всей цепи P вычисляется по формуле

$$P = \Sigma P_i. \tag{7.6}$$

Реактивная мощность всей цепи Q вычисляется по формуле

$$Q = \Sigma Q_{Li} - \Sigma Q_{Ci}. \tag{7.7}$$

Полная мощность всей цепи S определяется по формуле

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}\,. \tag{7.8}$$

Для построения векторной диаграммы линейных и фазных напряжений и токов необходимо определить углы сдвига между фазными напряжениями и соответствующими фазными токами для всех трех фаз.

Если элементы фазы соединены последовательно, то угол φ_i вычисляется по формуле

$$\varphi_i = \operatorname{arctg}\frac{X_i}{R_i}, \tag{7.9}$$

где X_i – реактивное сопротивление i-й фазы, Ом;

R_i – активное сопротивление i-й фазы, Ом.

Реактивное сопротивление каждой фазы вычисляется по формуле

$$X_i = \sum X_{Li} - \sum X_{Ci}. \tag{7.10}$$

Если сопротивления фазы соединены параллельно, то угол φ_i определяется по формуле

$$\varphi_i = \operatorname{arctg}\frac{b_i}{q_i}, \tag{7.11}$$

где b_i – реактивная проводимость i-й фазы, См;

q_i – активная проводимость i-й фазы, См.

Реактивная проводимость i-ой фазы вычисляется по формуле

$$b_i = \sum b_{Li} - \sum b_{Ci}. \tag{7.12}$$

При построении векторной диаграммы необходимо выполнить следующие операции:

1) записать для данной цепи одно векторное уравнение по первому закону Кирхгофа для токов и три векторных уравнения для напряжений по второму закону Кирхгофа:

$$I_A + I_B + I_C = I_N; \tag{7.13}$$

$$\begin{cases} \overrightarrow{U_{AB}} = \overrightarrow{U_A} - \overrightarrow{U_B} \\ \overrightarrow{U_{BC}} = \overrightarrow{U_B} - \overrightarrow{U_C} \\ \overrightarrow{U_{CA}} = \overrightarrow{U_C} - \overrightarrow{U_A} \end{cases}; \tag{7.14}$$

2) векторную диаграмму напряжений начинать с построения симметричной звезды векторов фазных напряжений $\bar{U}_A$, $\bar{U}_B$, $\bar{U}_C$. Линейные напряжения $\bar{U}_{AB}$, $\bar{U}_{BC}$, $\bar{U}_{CA}$ строить как векторные разности соответствующих фазных напряжений (7.14);

3) фазные токи $\bar{I}_A$, $\bar{I}_B$, $\bar{I}_C$ нужно строить под соответствующими фазовыми углами φ_i, относительно своих фазных напряжений;

4) вектор тока $\bar{I}_N$ в нейтральном проводе получить на диаграмме согласно уравнению (7.13).

7.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

В трехфазную сеть, соединенную способом «звезда» (рис. 7.11), с линейным напряжением $U_л$ = 220 В включены однофазные токоприемники: R_A = 5 Ом, X_{LA} = 10 Ом, R_B = 10 Ом, X_{LB} = 5 Ом, X_{CC} = 10 Ом.

Определить силу тока в фазах A, B, C; активную, реактивную и полную мощности каждой фазы в отдельности; активную, реактивную и полную мощности всех трех фаз; построить векторную диаграмму токов и напряжений и графически определить силу тока в нейтральном

проводе.

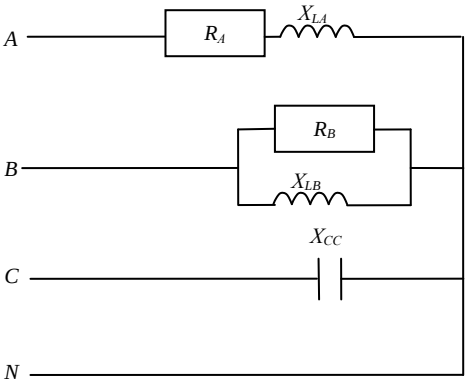


Рис. 7.11. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Решение

1. Фазное напряжение цепи:

$$U_A = U_B = U_C = \frac{U_Л}{\sqrt{3}} = \frac{220}{\sqrt{3}} = 127 \text{ В}.$$

2. Полное сопротивление фазы *A*:

$$Z_A = \sqrt{R_A{}^2 + X_{LA}{}^2} = \sqrt{5^2 + 10^2} = 11{,}2 \text{ Ом}.$$

3. Активная проводимость фазы *B*:

$$g_B = \frac{1}{R_B} = \frac{1}{10} = 0{,}1 \text{ См}.$$

4. Индуктивная проводимость фазы *B*:

$$b_{LB} = \frac{1}{X_{LB}} = \frac{1}{5} = 0{,}2 \text{ См}.$$

5. Полная проводимость фазы *B*:

$$y_B = \sqrt{g_B^2 + b_{LB}{}^2} = \sqrt{0{,}1^2 + 0{,}2^2} = 0{,}224 \text{ См}.$$

6. Полное сопротивление фазы *C*:

$$Z_C = X_{CC} = 10 \text{ Ом}.$$

7. Ток фазы *A*:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{127}{11{,}2} = 11{,}3 \text{ А}.$$

8. Ток фазы *B*:

$$I_B = U_B \cdot y_B = 127 \cdot 0{,}224 = 28{,}4 \text{ А}.$$

9. Ток фазы *C*:

$$I_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{127}{10} = 12{,}7 \text{ А}.$$

10. Мощность фазы *A*:

– активная:

$$P_A = I_A^2 \cdot R_A = 11{,}3^2 \cdot 5 = 638{,}5 \text{ Вт};$$

– реактивная:

$$Q_A = I_A^2 \cdot X_{LA} = 11{,}3^2 \cdot 10 = 1276{,}9 \text{ вар};$$

– полная:

$$S_A = \sqrt{P_A^2 + Q_A^2} = \sqrt{638{,}5^2 + 1276{,}9^2} = 1427{,}6 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

11. Мощность фазы *B*:

– активная:

$$P_B = U_B^2 \cdot g_B = 127^2 \cdot 0{,}1 = 1612{,}9 \text{ Вт};$$

– реактивная:

$$Q_B = U_B^2 \cdot b_{LB} = 127^2 \cdot 0{,}2 = 3225{,}8 \text{ вар};$$

– полная:

$$S_B = \sqrt{P_B^2 + Q_B^2} = \sqrt{1612{,}9^2 + 3225{,}8^2} = 3606{,}6 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

12. Мощность фазы *C*:

– реактивная:

$$Q_C = I_C^2 \cdot X_{CC} = 12{,}7^2 \cdot 10 = 1612{,}9 \text{ вар};$$

– полная:

$$S_C = Q_C = 1612{,}9 \text{ В·А}.$$

13. Мощность всей цепи:

– активная:

$$P = P_A + P_B = 638{,}5 + 1612{,}9 = 2251{,}4 \text{ Вт};$$

– реактивная:

$$Q = Q_A + Q_B - Q_C = 1276{,}9 + 3225{,}8 - 1612{,}9 = 2889{,}8 \text{ вар};$$

– полная:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2251{,}4^2 + 2889{,}8^2} = 3663{,}3 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

$$I = U(g_1 + g_2 + g_3) = 20(0{,}12 + 0{,}25 + 0{,}16) = 10{,}63 \text{ А}.$$

14. Для построения векторной диаграммы напряжений и токов выберем масштабы: μ_U = 50 В/см, μ_I = 10 А/см и определим углы сдвига между вектором фазного напряжения и соответствующим ему вектором фазного тока:

$$\varphi_A = \operatorname{arctg}\frac{X_{LA}}{R_A} = \operatorname{arctg}\frac{10}{5} = \operatorname{arctg}\ 2 = 63°27';$$

$$\varphi_B = \operatorname{arctg}\frac{b_{LB}}{g_B} = \operatorname{arctg}\frac{0{,}2}{0{,}1} = \operatorname{arctg}\ 2 = 63°27';$$

$$\varphi_C = \operatorname{arctg}\frac{X_{CC}}{R_C} = \operatorname{arctg}\frac{10}{0} = 90°.$$

Векторная диаграмма в выбранном масштабе построена на рис. 7.12.

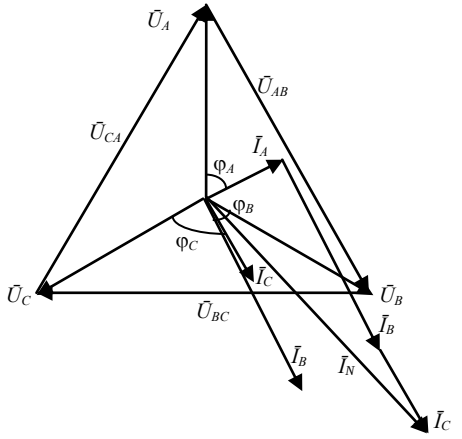


Рис. 7.12. Векторная диаграмма

Вектор тока $\bar{I}_N$ в нейтральном проводе получен на диаграмме путем сложения векторов тока всех трех фаз:

$$\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C = 3{,}13 \text{ см};$$

$$I_N = \bar{I}_N \cdot \mu_I = 3{,}13 \cdot 10 = 31{,}3 \text{ А}.$$

Лабораторная работа № 8.
ИЗМЕРЕНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ В ЦЕПЯХ ПЕРЕМЕННОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цели работы: 1. Изучить назначение, технические характеристики, устройство и принцип действия однофазного счетчика активной энергии и трехфазных счетчиков активной и реактивной энергии.

2. Определить относительную систематическую погрешность однофазного счетчика.

3. Определить стоимость потребляемой электрической энергии до и после установки компенсирующих конденсаторов.

8.1. ОБЪЕКТЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, в состав которой входят однофазный бытовой счетчик электрической энергии и трехфазные счетчики активной и реактивной энергии.

Технические характеристики однофазного счетчика *PI*2 следующие: тип СО-2, напряжение $U_н$ = 220 В, сила тока $I_н$ = 5 А, номинальная постоянная счетчика $C_{на}$ = 2880 Вт·с/об., класс точности 2,5 %.

Технические характеристики трехфазного четырехпроводного счетчика *PI*1 активной энергии следующие: тип СА4У-И672М, напряжение $U_{1л}/U_{1ф}$ = 380/220 В, сила тока $I_н$ = 3×5 А, частота $f_н$ = 50 Гц, номинальная постоянная $C_{на}$ = 8000 Вт·с/об., класс точности 2,0 %.

Технические характеристики трехфазного четырехпроводного счетчика *PK*1 реактивной энергии следующие: тип СР4У-И673М, напряжение $U_{1л}/U_{1ф}$ = 380/220 В, сила тока $I_н$ = 3×5 А, частота $f_н$ = 50 Гц, номинальная постоянная счетчика $C_{нр}$ = 8000 вар·с/об., класс точности 2,0 %.

Средствами исследования также являются: ваттметры *PW*1 и *PW*2 типа АСТД электродинамической системы для измерения активной мощности (напряжение $U_н$ = 300 В, сила тока $I_н$ = 5 А); варметр *PQ*1 типа Д539 электродинамической системы для измерения реактивной мощности (напряжение $U_н$ = 600 В, сила тока $I_н$ = 5 А).

Потребителями электрической энергии в лабораторной установке являются лампы накаливания (мощность $P_н$ = 100 Вт, напряжение

$U_н$ = 220 В).

Для создания необходимых режимов исследования в состав лабораторной установки входят: однополюсные однофазные выключатели *SA*1...*SA*5, служащие для подключения ламп *EL*1...*EL*5 в однофазную цепь.

8.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СЧЕТЧИКАХ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЭНЕРГИИ

В настоящее время для измерения расхода электрической энергии в цепях переменного тока служат индукционные приборы. Действие индукционного счетчика основано на взаимодействии вихревых токов с вращающимся магнитным полем.

Однофазный индукционный счетчик (рис. 8.1) состоит из двух электромагнитов.

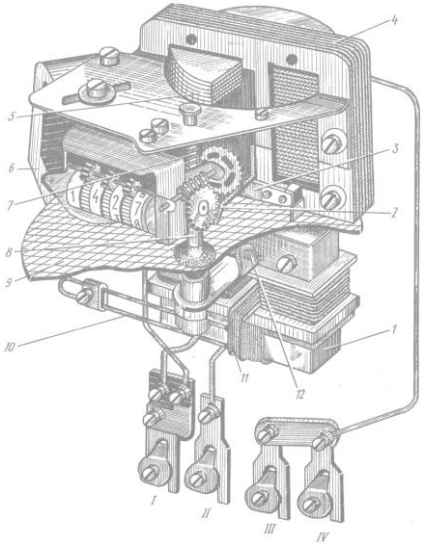


Рис. 8.1. Однофазный индукционный счетчик СО-2М:
1, 4 – электромагниты; *2* – стальная пластинка; *3* – медная пластинка; *5* – обмотка; *6* – постоянный магнит; *7* – червячный винт; *8* – ось; *9* – алюминиевый диск; *10* – петля; *11* – изолированный провод; *12* – компенсационный винт

Электромагнит *1* имеет обмотку из нескольких витков толстого провода, которая является токовой и включается в цепь последовательно. Через нее протекает ток, потребляемый электроприборами.

Токовая обмотка расположена на двух полюсах *U*-образного сердечника и имеет противоположную навивку, т.е. на одном полюсе по ходу часовой стрелки, а на другом – против хода часовой стрелки. Электромагнит *4* имеет обмотку *5* из большого числа витков тонкого провода, которая является обмоткой напряжения и включается в цепь параллельно. Неравномерность в количестве витков провода на токовой обмотке и обмотке напряжения необходима для того, чтобы вращающий момент, приложенный к алюминиевому диску *9*, был пропорционален активной мощности.

Между полюсами электромагнитов расположен алюминиевый диск *9*, насаженный на вертикальную ось *8*. На оси также крепятся железная пластинка, служащая для устранения самохода, и червячный винт *7*, передающий вращение диска счетному механизму. Счетный механизм показывает количество электрической энергии, прошедшей через счетчик в киловатт-часах.

В счетчике имеется также постоянный магнит *6*, служащий для торможения диска при выключенной нагрузке.

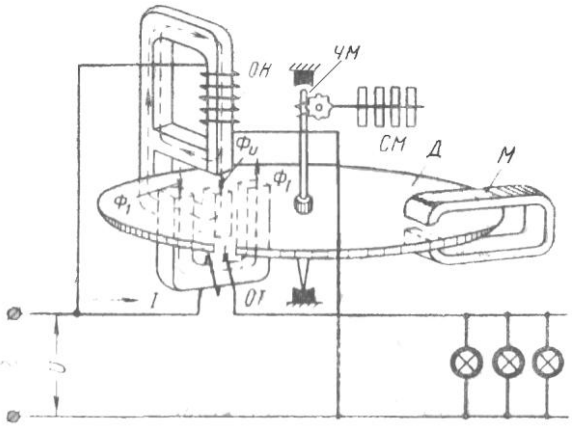


Рис. 8.2. Структурная схема однофазного счетчика активной энергии:
ОТ – токовая обмотка; *ОН* – обмотка напряжения; *Д* – алюминиевый диск;
ЧМ – червячный механизм; *СМ* – счетный механизм; *М* – постоянный магнит

При включении счетчика в цепь переменного тока (рис. 8.2) по токовой обмотке и обмотке напряжения будет проходить переменный ток, который, проходя по токовой обмотке, создает магнитный поток Φ_I, а проходя по обмотке напряжения – магнитный поток Φ_U. Магнит-

ные потоки Φ_I и Φ_U пересекают край алюминиевого диска *Д*, в котором наводятся местные вихревые токи, порождающие в нем магнитные поля. Последние, взаимодействуя с основными магнитными потоками, приводят диск во вращение.

Когда электроприборы отключены от сети, ток через счетчик не проходит. Диск пересекает магнитное поле постоянного магнита, и вокруг места пересечения диска магнитными линиями возникает вихревой ток, порождающий магнитный поток, который, взаимодействуя с полем магнита, препятствует вращению диска.

Для компенсации трения в счетчике создается дополнительный вращающий момент путем ввинчивания в сердечник электромагнита стального винта *12* (рис. 8.1).

Обмотка напряжения счетчика постоянно находится под напряжением. Увеличение напряжения сети может вызвать вращение диска без подключения электроприборов, т.е. самоход счетчика. Самоход счетчика может быть вызван также стальным компенсационным винтом или вибрацией щита, на котором укреплен счетчик. Для устранения самохода нужно пластинку *2* от полюса электромагнита *4* приблизить к пластинке на оси диска. При этом пластинка на оси больше намагничивается полюсной пластинкой *2* и сильнее к ней притягивается, благодаря чему тормозится вращение диска и устраняется самоход. Для того чтобы проверить счетчик на самоход, его необходимо подключить в сеть без подключения электроприборов.

Для регулирования значения и фазы магнитного потока на токовую обмотку наматывают несколько витков изолированного провода *11*, соединенного с проволокой в виде петли *10* с большим удельным сопротивлением. При изменении положения ползунка на петле изменяется сопротивление петли и значение тока, размагничивающего электромагнит *1*. Магнитный поток обмотки напряжения регулируется изменением положения медной пластинки *3* в магнитном шунте.

Приложенный к диску вращающий момент пропорционален произведению силы токов в обмотках электромагнитов и синуса угла сдвига фаз между ними:

$$M_{\text{вр}} = K \cdot I_I \cdot I_U \cdot \sin \varphi, \qquad (8.1)$$

где K – константа, объединяющая все постоянные величины – активную длину проводника, площадь электромагнита и радиус приложения силы, зависящий от размера диска;

I_I – сила тока, проходящая через токовую обмотку, А;

I_U – сила тока, проходящая через обмотку напряжения, А.

Вращающий момент также пропорционален активной мощности:

$$M_{вр} = K \cdot I \cdot U \cdot \cos \varphi = K \cdot P. \quad (8.2)$$

При вращении диск пересекает поле постоянного магнита *6*. Вихревые токи в диске, взаимодействуя с полем магнита, образуют противодействующий момент. Кроме этого основного тормозящего момента, в счетчике создаются еще два тормозящих момента от взаимодействия электромагнитов со своими индукционными токами. Результирующий противодействующий момент равен сумме этих трех тормозящих моментов и пропорционален скорости вращения алюминиевого диска:

$$M_{пр} = K \cdot \nu = K \cdot 2\pi \cdot R \cdot n = k \cdot n, \quad (8.3)$$

где n – число оборотов диска в секунду.

При установившейся частоте вращения диска вращающий и противодействующий моменты равны $M_{вр} = M_{пр}$, или $K \cdot P = k \cdot n$, откуда

$$P = C \cdot n, \quad (8.4)$$

где $C = k/K$ – постоянная счетчика.

Таким образом, скорость вращения диска пропорциональна мощности, потребляемой электроприборами. Энергия, потребляемая электроприборами, за некоторое время t:

$$W = C \cdot n \cdot t = C \cdot n. \quad (8.5)$$

Постоянная счетчика C равна энергии, измеряемой счетчиком за время одного оборота диска.

Счетчики маркируются следующим образом: САЗУ-И670.

Структура условного обозначения:

С – счетчик;

А – активной энергии, р – реактивной энергии, о – однофазный;

З – количество проводов сети (2…4);

У – универсальный;

И – индукционной системы;

670 – конструктивное исполнение счетчика.

Для измерения энергии в цепи трехфазного тока применяются трехфазные счетчики индукционной системы с двумя и тремя элементами. Двухэлементный трехфазный счетчик состоит из двух пар электромагнитов и двух алюминиевых дисков, расположенных на одной оси вертикально друг над другом. Двухэлементный счетчик включает-

ся в трехпроводную трехфазную сеть, а трехэлементный – в четырехпроводную.

8.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципиальными электрическими схемами лабораторной установки (рис. 8.3, 8.4) и табл. 8.1...8.3 для записи результатов опытов и вычислений. Записать паспортные данные объектов и средств исследования.

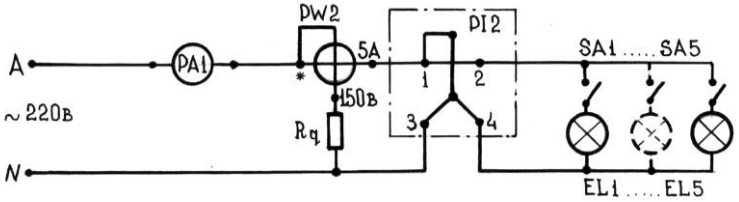


Рис. 8.3. Принципиальная электрическая схема испытания однофазного счетчика электрической энергии

Таблица 8.1. **Результаты исследования однофазного счетчика**

Измеряемые величины				Вычисляемые величины		
P, Вт	I, А	N, об.	t, с	$W_н$, Вт·с	$W_д$, Вт·с	γ, %

Таблица 8.2. **Результаты исследования трехфазных счетчиков без компенсирующих конденсаторов**

Измеряемые величины					Вычисляемые величины						
$P_ф$, Вт	$Q_л$, вар	$N_а$, об.	$N_р$, об.	t, с	$W_а$, Вт·с	$W_р$, вар·с	W, ВА·с	cos φ	cos $\varphi_{ср}$	$S_а$, руб.	$S_р$, руб.

Таблица 8.3. **Результаты исследования трехфазных счетчиков с компенсирующими конденсаторами**

Измеряемые величины					Вычисляемые величины						
$P_{ф1}$, Вт	$Q_{л1}$, вар	$N_{а1}$, об.	$N_{р1}$, об.	t, с	$W_{а1}$, Вт·с	$W_{р1}$, вар·с	W_1, ВА·с	cos φ_1	cos $\varphi_{ср1}$	$S_{а1}$, руб.	$S_{р1}$, руб.

2. Собрать цепь для исследования однофазного счетчика *PI*2 в соответствии с рис. 8.3. После разрешения преподавателя включить лабораторную установку в сеть с напряжением $U_н$ = 220 В и выключателями *SA*1...*SA*5 установить силу тока ламп накаливания *EL*1...*EL*5, приблизительно равную номинальному току счетчика ($I_н$ = 5 А). В течение промежутка времени t = 180...240 с подсчитать целое число оборотов диска счетчика N и записать результаты в табл. 8.1. Записать также значения силы тока ламп I по амперметру *PA*1 и активной мощности P по ваттметру *PW*2.

3. Собрать цепь для исследования трехфазных счетчиков *PI*1 и *PK*1 в соответствии с рис. 8.4. Для подсчета расхода энергии электродвигателем *M*1 без конденсаторов выключатель *QF*1 установить в положение «Выкл.». После разрешения преподавателя включить цепь на напряжение $U_{1л}/U_{1ф}$ = 380/220 В и по методике, изложенной в п. 8.2, произвести подсчет числа оборотов $N_а$ и $N_р$ дисков счетчиков активной и реактивной энергии. Записать в табл. 8.2 значения активной мощности одной фазы электродвигателя $P_ф$ по ваттметру *PW*1 и реактивной мощности $Q_л$ – по варметру *PQ*1.

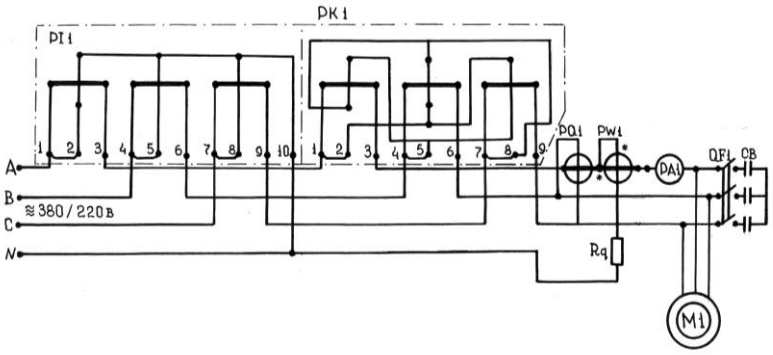


Рис. 8.4. Принципиальная электрическая схема испытания трехфазных счетчиков активной и реактивной электрической энергии

4. Установить выключатель *QF*1 в положение «Вкл.», таким образом будет подсчитываться электрическая энергия электродвигателя *M*1 с подключенными параллельно его обмоткам компенсирующими конденсаторами *CB*. За промежуток времени t подсчитать число оборотов $N_{а1}$ и $N_{р1}$ дисков счетчиков активной и реактивной энергии и записать их в табл. 8.3. Записать также значения активной мощности $P_{ф1}$ по

ваттметру $PW1$ и реактивной мощности $Q_{л1}$ – по варметру $PQ1$.

5. Используя результаты опыта, рассчитать для однофазного счетчика значения номинального $W_н$ и действительного $W_д$ расхода энергии. Вычислить также значение относительной систематической погрешности счетчика γ и установить его класс точности.

Для трехфазных счетчиков рассчитать номинальные значения активной W_a и W_{a1} и реактивной W_p и W_{p1} энергии. Рассчитать также полную энергию W и W_1, мгновенные и средние значения коэффициентов активной мощности $\cos\varphi$, $\cos\varphi_1$, $\cos\varphi_{ср}$ и $\cos\varphi_{ср1}$.

Рассчитать за заданный промежуток времени стоимость активной S_a и S_{a1}, а также реактивной S_p и S_{p1} энергии.

Построить треугольники энергий для электродвигателя с компенсирующими конденсаторами и без них.

8.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [1…5].

2. Ознакомиться с принципиальными электрическими схемами включения однофазного и трехфазных счетчиков активной и реактивной энергии.

3. Изучить схемы включения трехфазных счетчиков через измерительные трансформаторы тока.

8.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. При исследовании однофазного счетчика активной энергии действительное $W_д$ и номинальное $W_н$ значения активной энергии определяются по формулам

$$W_д = P \cdot t; \quad W_н = C_н \cdot N, \tag{8.6}$$

где P – мощность, измеренная ваттметром $PW2$, Вт;

N – число оборотов диска счетчика за промежуток времени t, об;

$C_н$ – постоянная счетчика, Вт·с/об.

Относительная систематическая погрешность γ счетчика определяется по формуле

$$\gamma = \frac{|W_н - W_д|}{W_н} \cdot 100\%. \qquad (8.7)$$

Класс точности счетчика показывает наибольшую допустимую погрешность в процентах, определяемую в нормальных условиях. Установлены четыре класса точности однофазных счетчиков – 1,0; 2,0; 2,5 и 3,0. При установлении класса точности однофазного счетчика нужно сравнить значение, вычисленное по формуле (8.7), с численными значениями классов точности.

2. Для трехфазных счетчиков номинальные значения активной $W_а$, реактивной $W_р$ и полной W энергии определяются по следующим формулам:

$$W_а = C_{са} \cdot N_а; \quad W_р = C_{нр} \cdot N_р; \quad W = \sqrt{W_а^2 + W_р^2}, \qquad (8.8)$$

где $C_{на}$, $C_{нр}$ – номинальные постоянные счетчиков активной и реактивной энергии, Вт·с/об.

3. Мгновенный и средний коэффициенты активной мощности cos φ и cos $\varphi_{ср}$ определяются по формулам

$$\cos\varphi = \frac{3P_ф}{\sqrt{9P_ф^2 + 3Q_л^2}}; \quad \cos\varphi_{ср} = \frac{W_а}{\sqrt{W_а^2 + W_р^2}}. \qquad (8.9)$$

4. Стоимость активной $S_а$ и реактивной $S_р$ энергии определяется по формулам

$$S_а = s_а \cdot W_а \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}; \quad S_р = s_р \cdot W_р \cdot 3,6 \cdot 10^{-6}, \qquad (8.10)$$

где $s_а$ – цена одного киловатт-часа активной энергии, руб/кВт·ч;

$s_р$ – цена одного киловар-часа реактивной энергии, руб/квар·ч.

Для выполнения лабораторной работы необходимо принять $s_а = s_р = 0,135$ у.е.

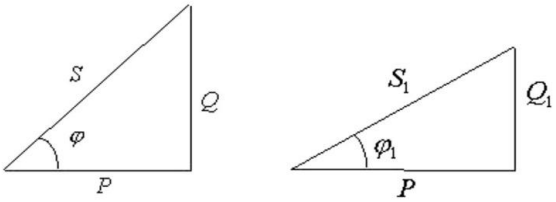
5. Треугольник энергий дает геометрическую интерпретацию всех энергий потребителя – активной $W_а$, реактивной $W_р$ и полной W. Треугольник энергий является прямоугольным и скалярным. В определенном масштабе активная энергия $W_а$ представляет собой горизонтальный катет треугольника, реактивная энергия $W_р$ – вертикальный катет, а полная энергия W – его гипотенузу.

8.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить устройство и принцип действия однофазного счетчика активной энергии.
2. Почему число оборотов диска счетчика пропорционально расходу энергии потребителем?
3. Объяснить устройство и принцип действия трехфазного счетчика.
4. Чем принципиально отличается счетчик реактивной энергии от счетчика активной энергии?
5. Объяснить физический смысл номинальной постоянной счетчика.
6. Как подключают трехфазный счетчик в сеть через измерительные трансформаторы тока?
7. При каких условиях диск счетчика реактивной энергии может изменить направление вращения на противоположное?
8. Дать определение класса точности счетчика.

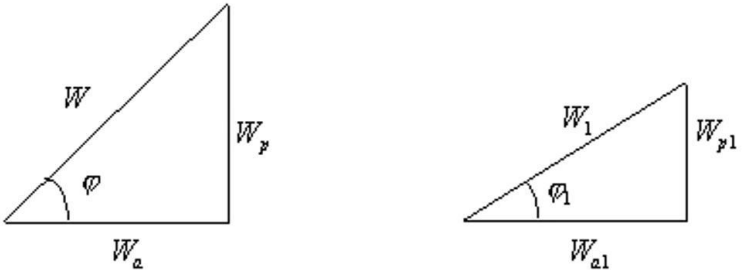
8.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Записать цель и название лабораторной работы.
2. Привести характеристику объектов и средств исследования (п. 8.1).
3. Вычертить принципиальную электрическую схему испытания однофазного счетчика электрической энергии (см. рис. 8.3).
4. Результаты исследований записать в табл. 8.1…8.3.
5. Построить треугольники мощностей и энергий электродвигателя с компенсирующими конденсаторами и без компенсирующих конденсаторов (рис. 8.5, 8.6).



а *б*

Рис. 8.5. Образцы построения треугольников мощностей электродвигателя с компенсирующими конденсаторами (*а*) и без компенсирующих конденсаторов (*б*)



а *б*

Рис. 8.6. Образцы построения треугольников энергий электродвигателя с компенсирующими конденсаторами (*а*) и без компенсирующих конденсаторов (*б*)

Лабораторная работа № 9. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цели работы: 1. Изучить назначение, паспортные данные, устройство, принцип действия и область применения трехфазного силового понижающего трансформатора.

2. Изучить основные схемы соединения первичных и вторичных обмоток трансформатора.

3. Экспериментально определить параметры трансформатора, а также величины, характеризующие его магнитную систему.

4. Построить векторные диаграммы напряжений и определить по ним группу соединения обмоток трансформатора.

9.1. ОБЪЕКТЫ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, объектом исследования на которой является трехфазный силовой понижающий трансформатор типа ТСЗИ-1,6 УХЛ2, сухой, защищенный, с естественным воздушным охлаждением. Номинальная мощность трансформатора $S_н$ = 1,6 кВ·А, первичное напряжение $U_{1н}$ = 380/220 В, вторичное напряжение $U_{2н}$ = 220/127 В, частота $f_н$ = 50…60 Гц, схема соединения первичных и вторичных обмоток – «звезда – треугольник» (Y/Δ). Число витков добавочной обмотки $W_д$ = 15, площадь сечения стержня магнитопровода $s = 1{,}25 \cdot 10^{-3}$ м^2, номинальный коэффициент

полезного действия трансформатора η = 94 %.

Средствами исследования служат следующие измерительные приборы: вольтметр электромагнитной системы типа Э59 (напряжение $U_н$ = 75…600 В), вольтметр электромагнитной системы типа Э531 (напряжение $U_н$ = 1,5…15 В), амперметр электромагнитной системы типа Э514 (ток $I_н$ = 1 и 2 А).

9.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТРАНСФОРМАТОРАХ

Силовой трансформатор – это статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования (понижения или повышения) напряжения в сетях переменного тока. Идею трансформатора после упорной семилетней работы по «превращению магнетизма в электричество» дал Майкл Фарадей.

29 августа 1831 года Фарадей описал в своем дневнике опыт, вошедший впоследствии во все учебники физики. На железное кольцо диаметром 15 см и толщиной 2 см экспериментатор намотал отдельно два провода длиной 15 м и 18 м. Когда по одной из обмоток шел ток, стрелки гальванометра на зажимах другой отклонялись! (рис.9.1).

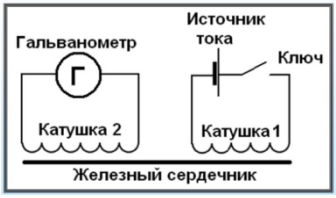


Рис. 9.1. Схема опыта Фарадея

Нехитрое устройство ученый назвал «индукционной катушкой» (рис. 9.2). При включении батареи ток (само собой разумеется, постоянный) постепенно нарастал в первичной обмотке. В железном кольце наводился магнитный поток, величина которого также менялась. Во вторичной обмотке возникало напряжение. Как только магнитный поток достигал предельного значения, «вторичный» ток исчезал.

Для того чтобы катушка действовала, нужно все время включать и выключать источник питания (вручную – рубильником или механически – коммутатором).

От фарадеевского кольца до сегодняшнего трансформатора было далеко, а наука уже тогда по крохам собирала необходимые данные.

Американец Генри обмотал провод шелковой ниткой – родилась изоляция.

Рис. 9.2. Индукционная катушка Фарадея

Француз Фуко попробовал вращать железные болванки в магнитном поле – и удивился: они нагревались. Ученый понял причину – сказывались токи, которые рождались в переменном магнитном поле. Чтобы ограничить путь вихревых токов Фуко, Эптон, сотрудник Эдисона, предложил делать железный сердечник сборным – из отдельных листов.

В 1872 году профессор Столетов провел фундаментальное исследование по намагниченности мягкого железа, а в 1885 году англичанин Юинг представил Королевскому обществу доклад о потерях энергии при перемагничивании стали.

Величина этих потерь, названных «гистерезисными» (от греческого слова «история»), действительно зависела от «прошлого» образца. Зерна металла – домены, словно подсолнухи за солнцем, поворачиваются вслед за магнитным полем и ориентируются вдоль силовых линий. Затрачиваемая при этом работа переходит в тепло. Она зависит от того, как – слабо или сильно – и в какую сторону были направлены домены.

В 1884 году братья Гопкинсоны предложили замкнуть сердечник.

Прежде магнитный поток шел по стальному пруту, а частично – из северного полюса в южный – по воздуху. Сопротивление воздуха в 8 тыс. раз больше, чем у железа. Получить заметное напряжение на вторичной обмотке было под силу только большим токам, проходящим по многим виткам. Если сердечник сделать кольцом или рамкой, то сопротивление снижается до минимума.

Первый в мире трансформатор был создан русским инженером П. Н. Яблочковым, который в 1876 г. высказал идею о возможности

трансформации переменного тока, а в 1885 г. предложил передавать энергию на значительные расстояния, используя для этой цели высокое напряжение переменного тока.

В простейшем виде трансформатор представляет собой устройство, в котором на сердечник *C*, собранный из пластин электротехнической стали, намотаны две обмотки (рис. 9.3). Одна из них – первичная *I* – подключена к источнику энергии, к другой – вторичной *II* – присоединен потребитель – нагрузка *H*.

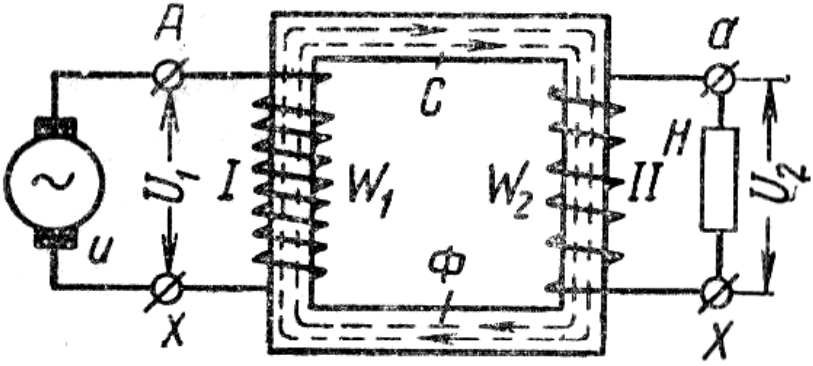


Рис. 9.3. Схема однофазного трансформатора:
U – источник энергии (генератор); *C* – стальной сердечник; *I* и *II* – первичная и вторичная обмотки; *H* – нагрузка

Ток, протекающий в первичной обмотке от источника энергии, создает в сердечнике переменный магнитный поток *Ф*, индуктирующий во вторичной обмотке электродвижущую силу. Для любого трансформатора отношение напряжений первичной U_1 и вторичной U_2 обмоток при холостом ходе приблизительно равно отношению чисел их витков:

$$U_1 / U_2 \approx \omega_1 / \omega_2 = k, \qquad (9.1)$$

где ω_1 и ω_2 – соответственно число витков первичной и вторичной обмоток.

Это отношение принято называть коэффициентом трансформации.

Если напряжение вторичной обмотки больше, чем подведенное к первичной, то трансформатор называют повышающим; в противном случае, когда вторичное напряжение меньше первичного, – понижающим. Один и тот же трансформатор можно использовать в качестве

понижающего и повышающего.

Мощности в первичной и во вторичной обмотках примерно равны между собой. Таким образом, для однофазного трансформатора

$$P = U_1 I_1 \approx U_2 I_2, \tag{9.2}$$

где I_1 и I_2 – соответственно ток в первичной и во вторичной обмотках.

Тогда коэффициент трансформации

$$k = U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1. \tag{9.3}$$

Следовательно, токи в обмотках трансформатора обратно пропорциональны напряжениям, а значит, и числам витков. Поэтому обмотку высшего напряжения всегда делают из большего числа витков провода меньшего сечения, тогда как обмотку низшего напряжения выполняют из меньшего числа витков провода большего сечения.

По числу фаз трансформаторы разделяют на однофазные и трехфазные, по числу обмоток – на двухобмоточные и трехобмоточные. По назначению различают силовые (предназначены для передачи и распределения электрической энергии) и специальные (сварочные, измерительные, печные, испытательные, инструментальные и др.) трансформаторы.

По способу охлаждения классификация такова: трансформаторы с воздушным (мощностью до 10 кВ·А), масляным, а также с масляным и принудительным воздушным охлаждением.

Трансформатор маркируется следующим образом: ТСЗИ-1,6 УХЛ2.

Структура условного обозначения:

Т – трехфазный, *О* – однофазный;

СЗ – сухой с воздушным охлаждением в защищенном исполнении, *С* – сухой с воздушным охлаждением в открытом исполнении, *М* – с естественным масляным охлаждением, *Д* – с масляным охлаждением и вентилятором;

И – для питания электроинструмента, *М* – многоцелевой;

1,6 – номинальная мощность, кВ·А;

УХЛ – климатическое исполнение (*У* – умеренный макроклиматический район, *ХЛ* – холодный макроклиматический район, *УХЛ* – объединение умеренного и холодного макроклиматических районов, *Т* – тропический макроклиматический район);

2 – категория размещения (*1* – эксплуатация на открытом воздухе, *2*

– эксплуатация под навесом, *3* – эксплуатация в крытых помещениях с естественной вентиляцией, *4* – эксплуатация в крытых помещениях с отоплением и с искусственной вентиляцией, *5* – работа во влажных ограниченных пространствах без отопления и вентиляции при наличии воды либо конденсата).

В зависимости от способа соединения обмоток трансформаторы различают по группам и схемам соединений.

Группой соединения называют комбинацию схем соединения обмоток высшего и низшего напряжений. Группа соединения показывает (по аналогии с взаимным расположением стрелок на часах – часовой и минутной) взаимное расположение векторов линейного низшего напряжения по отношению к векторам линейного высшего напряжения в каждой фазе. Вектор высшего напряжения принимают за минутную стрелку и устанавливают против цифры 12, а вектор низшего напряжения – за часовую стрелку.

Из всех возможных способов соединения обмоток трехфазных двухобмоточных трансформаторов наибольшее распространение нашли схемы соединения «звезда – звезда – нуль».

9.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципиальной электрической схемой лабораторной установки (рис. 9.4) и табл. 9.1 для записи результатов испытания трансформатора. Определить цену деления измерительных приборов.

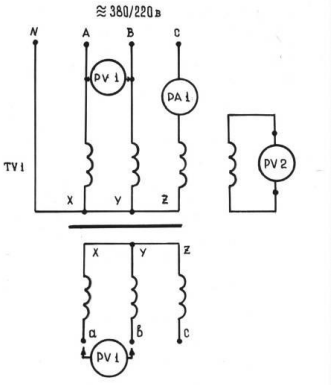


Рис. 9.4. Принципиальная электрическая схема испытания трехфазного силового трансформатора

Таблица 9.1. **Результаты испытания трехфазного трансформатора**

№ п.п.	Измеряемые величины						
	$U_{1л}$, В	$U_{1ф}$, В	$U_{2л}$, В	$U_{2ф}$, В	$U_д$, В	$I_{1ф}$, А	s, м^2
1	2	3	4	5	6	7	8

Продолжение табл. 9.1

№ п.п.	Вычисляемые величины							
	$I_{1л}$, А	$I_{2л}$, А	ω_1	ω_2	k	F_1, А·в	Φ_1, Вб	B_1, Тл
1	9	10	11	12	13	14	15	16

2. С разрешения преподавателя включить трансформатор в сеть. Вольтметром *PV*1 необходимо поочередно измерить и записать в соответствующие графы табл. 9.1 линейные $U_{1л}$ и фазные $U_{1ф}$ напряжения первичных обмоток трансформатора, линейные $U_{2л}$ и фазные $U_{2ф}$ напряжения вторичных обмоток. Пользуясь вольтметром *PV*2 и амперметром *PA*1, следует измерить соответственно напряжение $U_д$ на добавочной обмотке и ток $I_{1ф}$ первичной обмотки трансформатора.

3. По результатам измерений необходимо вычислить линейные токи трансформатора $I_{1Л}$ и $I_{2Л}$, число витков первичной ω_1 и вторичной ω_2 обмоток, коэффициент трансформации k. Следует определить также магнитные величины холостого хода для одной обмотки трансформатора: магнитодвижущую силу первичной обмотки F_1, магнитный поток Φ_1 и магнитную индукцию B_1.

4. Построить векторную диаграмму напряжений испытуемого трансформатора.

9.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [1, 2, 5, 6].

2. Записать и пояснить основные паспортные данные силового трехфазного трансформатора.

3. Изучить принципиальные схемы основных способов соединения

первичных и вторичных обмоток трехфазного трансформатора.

9.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. При соединении обмоток трехфазного трансформатора способом «звезда» для первичных и вторичных обмоток линейное $U_л$ и фазное $U_ф$ напряжения связаны формулой

$$U_л = \sqrt{3} \cdot U_ф, \tag{9.4}$$

а линейный $I_л$ и фазный $I_ф$ токи равны между собой:

$$I_л = I_ф. \tag{9.5}$$

2. Номинальная полная мощность $S_н$ трансформатора независимо от способа соединения обмоток вычисляется по формуле

$$S_н = \sqrt{3} U_{1н} I_{1н} = \sqrt{3} U_{2н} I_{2н}, \tag{9.6}$$

где $U_{1н}$ и $U_{2н}$ – соответственно номинальные напряжения первичной и вторичной обмоток трансформатора, В;

$I_{1н}$ и $I_{2н}$ – номинальные токи первичной и вторичной обмоток трансформатора, А.

3. Число витков первичной ω_1 и вторичной ω_2 обмоток трансформатора можно приближенно вычислить по следующим формулам:

$$\omega_1 = \omega_д \cdot \frac{U_{1ф}}{U_д}; \qquad \omega_2 = \omega_д \cdot \frac{U_{2ф}}{U_д}, \tag{9.7}$$

где $\omega_д$ – число витков добавочной обмотки трансформатора.

Коэффициент трансформации k трансформатора определяется по формуле

$$k = \omega_1 / \omega_2. \tag{9.8}$$

4. Магнитодвижущая сила (м.д.с.) холостого хода трансформатора определяется по формуле

$$F_1 = \omega_1 \cdot I_1, \tag{9.9}$$

а магнитный поток, проходящий по сердечнику, –

$$\Phi_1 = U_{1\phi} / 2\pi \cdot f \cdot \omega_1, \qquad (9.10)$$

где f – промышленная частота тока сети (f = 50 Гц).

Магнитная индукция сердечника трансформатора B_1 определяется по формуле

$$B_1 = \Phi_1 / s \cdot c, \qquad (9.11)$$

где s – площадь сечения магнитопровода трансформатора ($s = 1{,}25 \cdot 10^{-3}$ м^2);

c – коэффициент заполнения магнитопровода сталью ($c = 0{,}85 \ldots 0{,}95$).

5. При построении векторной диаграммы напряжений трансформатора сначала строится векторная диаграмма фазных $\bar{U}_{AN}$, $\bar{U}_{BN}$, $\bar{U}_{CN}$ и линейных $\bar{U}_{AB}$, $\bar{U}_{BC}$, $\bar{U}_{CA}$ напряжений первичных обмоток. При этом следует использовать следующие векторные уравнения (для схемы Y/Y):

$$\begin{cases} \vec{U}_{AB} = \vec{U}_{AN} - \vec{U}_{BN}; \\ \vec{U}_{BC} = \vec{U}_{BN} - \vec{U}_{CN}; \\ \vec{U}_{CA} = \vec{U}_{CN} - \vec{U}_{AN}. \end{cases} \qquad (9.12)$$

Затем строится векторная диаграмма фазных $\bar{U}_{ax}$, $\bar{U}_{by}$, $\bar{U}_{cz}$ и линейных $\bar{U}_{ab}$, $\bar{U}_{bc}$, $\bar{U}_{ca}$ напряжений вторичных обмоток трансформатора. Векторы одноименных фазных напряжений первичных и вторичных обмоток трансформатора параллельны между собой:

$$\bar{U}_{AN} \,//\, \bar{U}_{ax};\ \bar{U}_{BN} \,//\, \bar{U}_{by};\ \bar{U}_{CN} \,//\, \bar{U}_{cz}. \qquad (9.13)$$

Для определения группы соединения обмоток трехфазного трансформатора по векторной диаграмме следует вычислить угол в градусах между одноименными векторами линейных напряжений первичных и вторичных обмоток, например, угол между векторами $\bar{U}_{AB}$ и $\bar{U}_{ab}$. Число, полученное в результате деления значения этого угла на 30°, дает искомую группу соединения обмоток.

9.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить устройство и принцип действия трехфазного трансформатора.

2. Назвать основные паспортные величины трехфазного трансфор-

матора.

3. Перечислить основные схемы соединения обмоток трансформатора.

4. Произвести расшифровку марки трансформатора.

5. Указать группы соединения обмоток трансформатора.

6. Построить векторную диаграмму вторичных напряжений трансформатора, если одна из обмоток «опрокинута».

7. Назвать известные вам причины перегрева трансформатора, причины ненормального гудения трансформатора.

8. Почему все металлические части трансформатора необходимо заземлять?

9.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

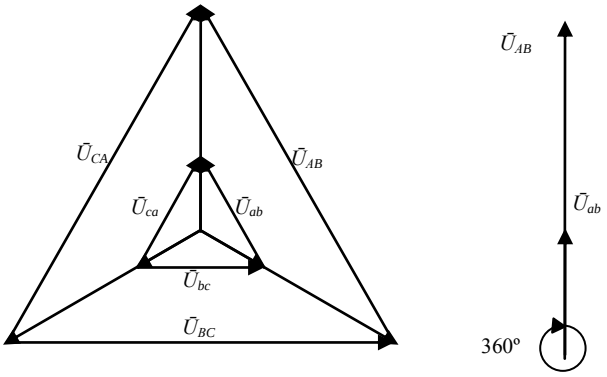
1. Записать название и цель лабораторной работы.

2. Привести характеристику объектов и средств исследования (п. 1).

3. Вычертить принципиальную электрическую схему испытания трехфазного силового трансформатора (см. рис. 9.4).

4. Результаты исследований записать по форме табл. 9.1.

5. На основании полученных данных, используя масштаб напряжения (μ_U = 50 В/см), построить векторную диаграмму напряжений (см. рис. 9.5, *а*), а также определить группу соединений обмоток трансформатора (см. рис. 9.5, *б*).



а *б*

Рис. 9.5. Векторная диаграмма напряжений (*а*) и группа соединений обмоток трансформатора (*б*)

Лабораторная работа № 10.
РАСЧЕТ ТРЕХФАЗНЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Цели работы: 1. Изучить основные соотношения, возникающие при работе трехфазного трансформатора.

2. Получить практические навыки расчета трехфазного силового трансформатора.

10.1. ИСХОДНЫЕ ДАННЫЕ

Трехфазный понижающий силовой трансформатор имеет технические данные, приведенные в табл. 10.1: номинальную мощность $S_н$, номинальное высшее линейное напряжение $U_{1л}$, номинальное низшее линейное напряжение $U_{2л}$, мощность потерь холостого хода (при номинальном напряжении) P_0, мощность потерь короткого замыкания (при номинальном токе) $P_к$, схемы соединения первичных и вторичных обмоток трансформатора (рис. 10.1-10.10).

Требуется определить:

1. Фазные напряжения трансформатора.
2. Линейный и фазный коэффициенты трансформации трансформатора.
3. Линейные и фазные токи трансформатора.
4. Коэффициент полезного действия при коэффициенте мощности нагрузки $\cos \varphi_м = 0{,}9$ и коэффициенте нагрузки $\beta = 75\%$ от номинальной.
5. Годовой коэффициент полезного действия при полной нагрузке $\beta = 1$ и коэффициенте мощности $\cos \varphi_м = 0{,}8$, времени работы под нагрузкой в году $T = 7000$ ч.
6. Построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений для первичных и вторичных обмоток трансформатора и определить группу соединения обмоток.

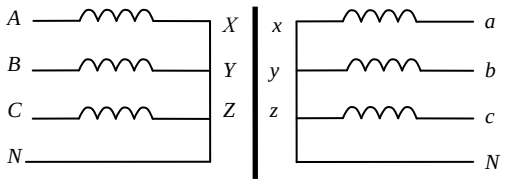


Рис. 10.1. Схема № 1

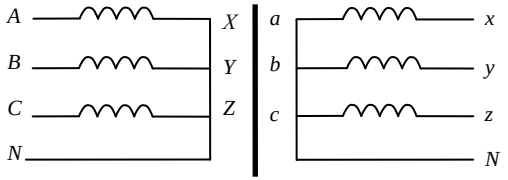


Рис. 10.2. Схема № 2

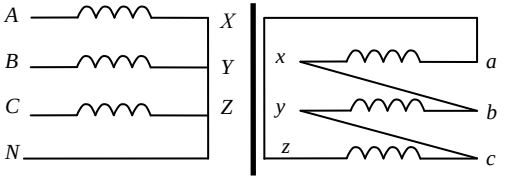


Рис. 10.3. Схема № 3

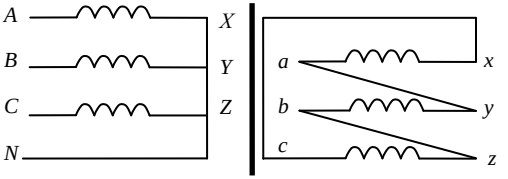


Рис. 10.4. Схема № 4

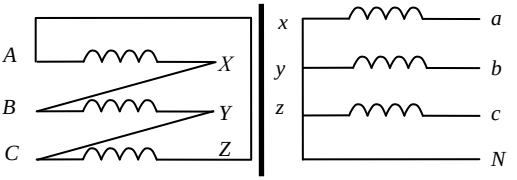


Рис. 10.5. Схема № 5

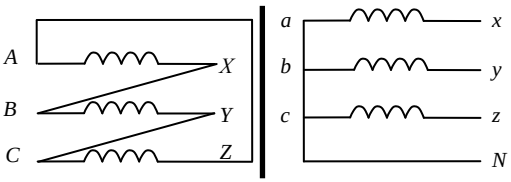


Рис. 10.6. Схема № 6

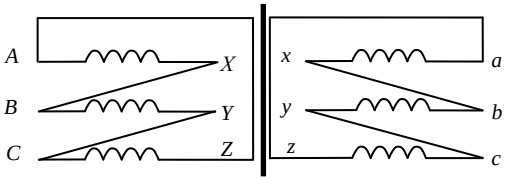


Рис. 10.7. Схема № 7

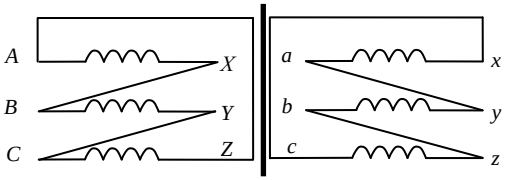


Рис. 10.8. Схема № 8

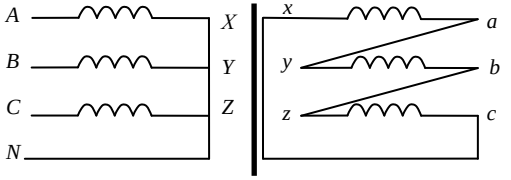


Рис. 10.9. Схема № 9

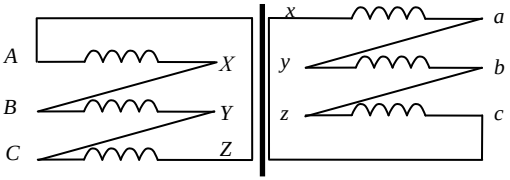


Рис. 10.10. Схема № 10

Таблица 10.1. **Исходные данные**

Варианты		Данные для расчета				
Номер схемы	Строка	$S_н$	$U_{1л}$	$U_{2л}$	P_0	$P_к$
		кВА	кВ	кВ	кВт	кВт
1	2	3	4	5	6	7
1	1	100	20	5	0,5	1
	2	200	35	10	0,6	2
	3	300	50	15	0,7	3
	4	400	65	20	0,8	4
	5	500	80	25	0,9	5
	6	600	95	30	1,0	6
	7	700	110	35	1,1	7
	8	800	125	40	1,2	8
	9	900	140	45	1,3	9
	10	1000	155	50	1,4	10
2	1	1100	165	55	1,5	11
	2	1200	175	60	1,6	12
	3	1300	185	65	1,7	13
	4	1400	195	70	1,8	14
	5	1500	205	75	1,9	15
	6	1600	215	80	2,0	16
	7	1700	225	85	2,1	17
	8	1800	235	90	2,2	18
	9	1900	245	95	2,3	19
	10	2000	255	100	2,4	20
3	1	2100	260	102	2,5	21
	2	2200	265	104	2,6	22
	3	2300	270	106	2,7	23
	4	2400	275	108	2,8	24
	5	2500	280	110	2,9	25
	6	2600	285	112	3,0	26
	7	2700	290	114	3,1	27
	8	2800	295	116	3,2	28
	9	2900	300	118	3,3	29
	10	3000	305	120	3,4	30

Продолжение табл. 10.1

1	2	3	4	5	6	7
4	1	3100	310	130	3,5	31
	2	3200	315	140	3,6	32
	3	3300	320	150	3,7	33
	4	3400	325	160	3,8	34
	5	3500	330	170	3,9	35
	6	3600	335	180	4,0	36
	7	3700	340	190	4,1	37
	8	3800	345	200	4,2	38
	9	3900	350	210	4,3	39
	10	4000	355	220	4,4	40
5	1	4100	370	225	4,5	41
	2	4200	385	230	4,6	42
	3	4300	400	235	4,7	43
	4	4400	415	240	4,8	44
	5	4500	430	245	4,9	45
	6	4600	445	250	5,0	46
	7	4700	460	255	5,1	47
	8	4800	475	260	5,2	48
	9	4900	490	265	5,3	49
	10	5000	505	270	5,4	50
6	1	5100	515	275	5,5	51
	2	5200	525	280	5,6	52
	3	5300	535	285	5,7	53
	4	5400	545	290	5,8	54
	5	5500	555	295	5,9	55
	6	5600	565	300	6,0	56
	7	5700	575	305	6,1	57
	8	5800	585	310	6,2	58
	9	5900	595	315	6,3	59
	10	6000	605	320	6,4	60
7	1	6100	610	322	6,5	61
	2	6200	615	324	6,6	62
	3	6300	620	326	6,7	63
	4	6400	625	328	6,8	64
	5	6500	630	330	6,9	65
	6	6600	635	332	7,0	66
	7	6700	640	334	7,1	67
	8	6800	645	336	7,2	68
	9	6900	650	338	7,3	69
	10	7000	655	340	7,4	70
8	1	7100	660	350	7,5	71
	2	7200	665	360	7,6	72
	3	7300	670	370	7,7	73
	4	7400	675	380	7,8	74

Окончание табл. 10.1

1	2	3	4	5	6	7
8	5	7500	680	390	7,9	75
	6	7600	685	400	8,0	76
	7	7700	690	410	8,1	77
	8	7800	695	420	8,2	78
	9	7900	700	430	8,3	79
	10	8000	705	440	8,4	80
9	1	8100	720	445	8,5	81
	2	8200	735	450	8,6	82
	3	8300	750	455	8,7	83
	4	8400	765	460	8,8	84
	5	8500	780	465	8,9	85
	6	8600	795	470	9,0	86
	7	8700	810	475	9,1	87
	8	8800	825	480	9,2	88
	9	8900	840	485	9,3	89
	10	9000	855	490	9,4	90
10	1	9100	865	495	9,5	91
	2	9200	875	500	9,6	92
	3	9300	885	505	9,7	93
	4	9400	895	510	9,8	94
	5	9500	905	515	9,9	95
	6	9600	915	520	10,0	96
	7	9700	925	525	10,1	97
	8	9800	935	530	10,2	98
	9	9900	945	535	10,3	99
	10	10000	955	540	10,4	100

10.2. МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ ПО РЕШЕНИЮ ЗАДАЧИ

Задача относится к расчету трехфазного силового трансформатора, способ соединения обмоток которого задан. Для решения задачи необходимо изучить §13.10 [1] или §9.8 [2].

Распространенными схемами соединения обмоток трансформаторов являются схема «звезда», обозначаемая буквой У (или символом Y), и схема «треугольник», обозначаемая буквой Д (или символом Δ).

Обмотка высшего напряжения (ВН) может быть соединена или в Y или в Δ независимо от способа соединения обмотки низшего напряжения (НН). Очевидно, что число основных схем соединения обмоток равно четырем, а именно Y/Y, Δ/Δ, Y/Δ и Δ/Y. Здесь над чертой показано обозначение схемы соединения обмоток ВН, под чертой – обмо-

ток НН. Начала обмоток ВН обозначаются заглавными латинскими буквами *A*, *B*, *C*; концы этих же обмоток буквами *X*, *Y*, *Z*. Начала обмоток НН обозначаются прописными латинскими буквами *a*, *b*, *c*; концы – *x*, *y*, *z*.

Разнообразие схем и способов соединений обмоток приводит к необходимости указывать численное значение фазового угла между векторами линейных одноименных напряжений обмоток ВН и НН трансформатора. Фазовые углы определяют так называемые группы соединения обмоток. Всего насчитывается двенадцать групп от 0 до 11 включительно.

Трехфазные трансформаторы имеют два коэффициента трансформации – линейный и фазный. Линейный коэффициент определяется как отношение линейного напряжения $U_{1л}$ ($U_{1н}$) обмотки ВН к линейному напряжению $U_{2л}$ ($U_{2н}$) обмотки НН:

$$K_{л} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} = \frac{U_{1н}}{U_{2н}}. \qquad (10.1)$$

Фазный коэффициент трансформации равен отношению фазного напряжения обмотки ВН $U_{1ф}$ к фазному напряжению обмотки НН $U_{2ф}$:

$$K_{ф} = \frac{U_{1ф}}{U_{2ф}}. \qquad (10.2)$$

При соединении обмоток по способу «звезда» используют формулы:

$$U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}, \qquad (10.3)$$

$$I_{л} = I_{ф}. \qquad (10.4)$$

При соединении обмоток по способу «треугольник» используют формулы:

$$U_{л} = U_{ф}, \qquad (10.5)$$

$$I_{л} = \sqrt{3}I_{ф}. \qquad (10.6)$$

Для определения токов обмоток ВН и НН используют формулы полной мощности трансформатора:

$$S_{1н} = S_{2н}, \qquad (10.7)$$

или

$$\sqrt{3}U_{1л}I_{1л} = \sqrt{3}U_{2л}I_{2л}. \quad (10.8)$$

Коэффициент полезного действия трансформатора можно определять по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_н \cos\varphi_2 \cdot 100}{\beta S_н \cos\varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_к}, \quad (10.9)$$

где cos φ_2 – коэффициент активной мощности потребителя;

P_0 – мощность потерь холостого хода, кВт;

$P_к$ – мощность потерь короткого замыкания, кВт;

β – коэффициент нагрузки трансформатора.

Годовой к. п. д. учитывает экономичность работы трансформатора за год:

$$\eta_г = \frac{\beta S_н \cos\varphi_2 T \cdot 100}{\beta S_н \cos\varphi_2 T + P_0 T_0 + \beta^2 P_к T}, \quad (10.10)$$

где T – время работы под нагрузкой, ч. Принимаем T = 7000 ч;

T_0 – время работы на холостом ходу, ч. Принимаем T_0 = 8760 ч.

При построении векторной диаграммы напряжений трансформатора с высшей и низшей сторон необходимо:

1) построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений обмоток ВН: $\bar{U}_{AX}$, $\bar{U}_{BY}$, $\bar{U}_{CZ}$, $\bar{U}_{AB}$, $\bar{U}_{BC}$, $\bar{U}_{CA}$. Следует учитывать, что при соединении обмоток трансформатора в треугольник линейные напряжения равны фазным;

2) построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений обмоток НН: $\bar{U}_{ax}$, $\bar{U}_{by}$, $\bar{U}_{cz}$, $\bar{U}_{ab}$, $\bar{U}_{bc}$, $\bar{U}_{ca}$. Векторы одноименных фазных напряжений обмоток ВН и НН параллельны между собой, например $\bar{U}_{AX} \| \bar{U}_{ax}$, $\bar{U}_{BY} \| \bar{U}_{by}$, $\bar{U}_{CZ} \| \bar{U}_{cz}$. Следует учитывать также, что если на электрической схеме обозначения начал и концов обмоток ВН и НН отражаются зеркально, т.е. симметричны, то соответствующие одноименные вектора ВН и НН направлены в одну и ту же сторону. В противном случае вектора будут направлены в противоположную сторону. Аналогично необходимо учитывать и направление соединения обмоток при соединении обмоток трансформатора в треугольник (*a*, *b*, *c* или *a*, *c*, *b*);

3) для определения группы соединения обмоток трансформатора нужно по векторной диаграмме вычислить, фазовый угол между одноименными линейными векторами напряжений обмоток ВН и НН, на-

пример, угол между векторами $\bar{U}_{AB}$ и $\bar{U}_{ab}$. Число получающееся в результате деления значений этого угла на 30º и дает искомую группу соединения обмоток трансформатора.

Примечание. Фазовый угол сдвига следует отсчитывать от вектора линейного напряжения обмотки ВН до одноименного вектора линейного напряжения обмотки НН по часовой стрелке.

10.3. ПРИМЕР РЕШЕНИЯ ЗАДАЧИ

Трехфазный понижающий силовой трансформатор имеет следующие технические данные: $S_н$ = 25 кВА; $U_{1л}$ = 6 кВ; $U_{2л}$ = 2 кВ; P_0 = 0,2 кВт; $P_к$ = 0,1 кВт; способ соединения обмоток (рис. 10.11), Δ/Δ.

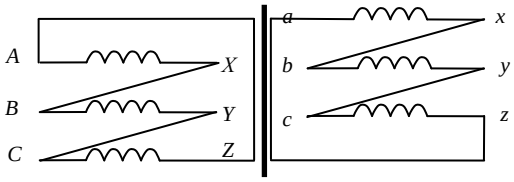


Рис 10.11. Принципиальная электрическая схема к решению задачи

Определить линейный и фазный коэффициенты трансформации, фазные напряжения, линейные и фазные токи, коэффициент полезного действия при cos φ_2 = 0,8 и коэффициенте нагрузки β = 80% номинальной. Определить также годовой коэффициент полезного действия при полной нагрузке β = 1, при cos φ_2 = 0,9 и времени работы T = 5000 ч. Построить векторную диаграмму линейных и фазных напряжений трансформатора, определить группу трансформатора.

Решение

1. Линейный коэффициент трансформации:

$$K_л = \frac{U_{1л}}{U_{2л}} = \frac{6}{2} = 3.$$

2. Фазный коэффициент трансформации:

$$K_ф = \frac{U_{1ф}}{U_{2ф}} = \frac{6}{2} = 3.$$

3. Фазное напряжение обмотки ВН:

$$U_{1ф} = U_{1л} = 6 \text{ кВ}.$$

4. Фазное напряжение обмотки НН:

$$U_{2ф} = U_{2л} = 2 \text{ кВ}.$$

5. Линейный ток обмотки ВН:

$$I_{1л} = \frac{S_н}{\sqrt{3}U_{1л}} = \frac{25}{\sqrt{3}\cdot 6} = 2{,}41 \text{ А}.$$

6. Фазный ток обмотки ВН:

$$I_{1ф} = \frac{I_{1л}}{\sqrt{3}} = \frac{2{,}41}{\sqrt{3}} = 1{,}39 \text{ А}.$$

7. Линейный ток обмотки НН:

$$I_{2л} = \frac{S_н}{\sqrt{3}U_{2л}} = \frac{25}{\sqrt{3}\cdot 2} = 7{,}22 \text{ А}.$$

8. Фазный ток обмотки НН:

$$I_{2ф} = \frac{I_{2л}}{\sqrt{3}} = \frac{7{,}22}{\sqrt{3}} = 4{,}17 \text{ А}.$$

9. Коэффициент полезного действия:

$$\eta = \frac{\beta S_н \times \cos\alpha_2 \times 100}{\beta S_н \cos\alpha_2 + P_0 + \beta^2 P_к} = \frac{0{,}8\times 25\times 0{,}8\times 100}{0{,}8\times 25\times 0{,}8 + 0{,}2 + 0{,}8^2\times 0{,}1} = 98{,}4\%$$

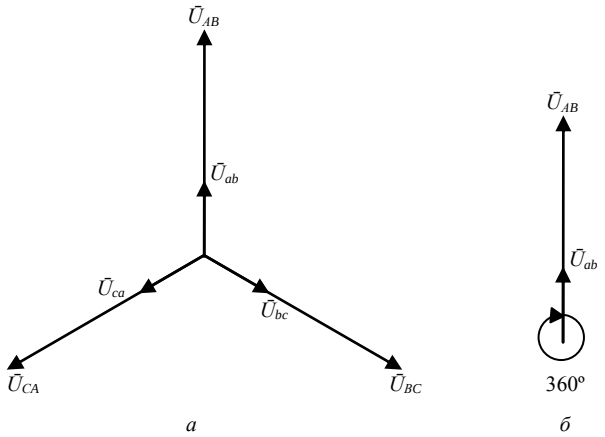
10. Годовой коэффициент полезного действия:

$$\eta_{год} = \frac{\beta S_н \times \cos\alpha_2 \times T \times 100}{\beta S_н \cos\alpha_2 \times T + P_0 \times T_0 + \beta^2 P_к \times T} = \frac{1\times 25\times 0{,}9\times 5000\times 100}{1\times 25\times 0{,}9\times 5000 + 0{,}2\times 8760 + 1^2\times 0{,}1\times 5000} = 98\%$$

11. Для построения векторной диаграммы напряжений выберем масштаб напряжений обмоток ВН и НН, μ_U = 2 кВ/см. Векторы линейных (фазных) напряжений обмоток НН параллельны векторам фазных напряжений обмоток ВН (рис. 10.12, *а*).

Из векторной диаграммы номер группы трансформатора определяется делением фазового угла сдвига между векторами $\bar{U}_{AB}$ и $\bar{U}_{ав}$ на 30^0,

в результате имеем 12, то есть нулевую группу трансформатора Δ/Δ-0 (см. рис.10.12, *б*.).



а *б*

Рис. 10.12. Векторные диаграммы

Лабораторная работа № 11. ИСПЫТАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цели работы: 1. Изучить назначение, паспортные данные, устройство, принцип действия и области применения асинхронного трехфазного двигателя с короткозамкнутым ротором.

2. Изучить основные рабочие характеристики электродвигателя и получить их экспериментально на лабораторной установке.

11.1. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, объектом исследования на которой является агрегат, состоящий из асинхронного трехфазного электродвигателя и генератора постоянного тока.

Электродвигатель типа А02, его номинальная мощность $P_н$ = 2,2 кВт, номинальная частота вращения $n_н$ = 1440 мин$^{-1}$, номинальное напряжение $U_н$ = 220/380 В, способ соединения обмоток двигателя – «треугольник – звезда», номинальный ток $I_н$ = 4,37 А, номинальный коэффициент мощности cos $\varphi_н$ = 0,9, номинальный коэффи-

циент полезного действия $\eta_н = 85$ %.

Генератор постоянного тока с самовозбуждением служит нагрузкой для испытуемого двигателя. Генератор имеет следующие паспортные данные: $P_н = 1{,}5$ кВт, $U_н = 220$ В, $I_н = 8{,}6…9{,}0$ А, $n_н = 1500$ мин$^{-1}$, $\eta_н = 85$ %.

Средства исследования: вольтметр *PV*1 электромагнитной системы типа ЭП2 с номинальным напряжением $U_н = 600$ В, амперметр *PA*1 электромагнитной системы типа Э59 с током $I_н = 10$ А, ваттметр *PW*1 трехфазный двухэлементный ферродинамической системы типа Д571 с напряжением $U_н = 250$ В и током $I_н = 5$ А, амперметр *PA*2 электромагнитной системы типа Э59 с номинальным током $I_н = 5$ и 10 А, вольтметр *PV*2 астатический типа АСТВ с напряжением $U_н = 150$ и 300 В.

Для изменения нагрузки на двигатель к генератору через однополюсные однофазные выключатели *SA*1...*SA*5 могут подключаться лампы накаливания *EL*1...*EL*5. Активная мощность одной лампы накаливания $P_н = 300$ Вт, номинальное напряжение $U_н = 220$ В. Для измерения скорости вращения вала двигателя имеется электронный тахометр типа ТЧ10-РС с диапазоном измерения $n_н = 0…9999$ мин$^{-1}$.

11.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ ОБ АСИНХРОННЫХ ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯХ

Трехфазный асинхронный электродвигатель, изобретенный в конце XIX века русским ученым-электротехником М. О. Доливо-Добровольским, получил в настоящее время широкое распространение и в промышленности, и в сельском хозяйстве (около 95 % всех двигателей – асинхронные).

Сердечник *2* статора (рис. 11.1) набирается из стальных пластин толщиной 0,35 или 0,5 мм. Пластины штампуют с впадинами (пазами), изолируют лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи, собирают в отдельные пакеты и крепят в станине *1* двигателя. К станине прикрепляют также боковые щиты с помещенными на них подшипниками, на которые опирается вал ротора. Станину устанавливают на фундаменте. В продольные пазы статора укладывают проводники его обмотки *3*, которые соединяют между собой так, что образуется трехфазная система.

Основное назначение обмотки статора – создание вращающегося магнитного поля.

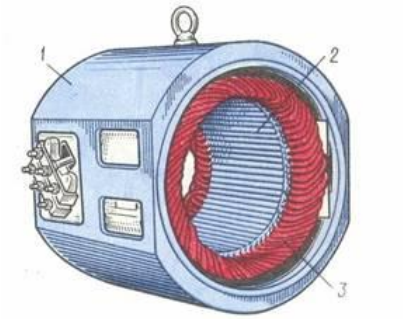


Рис. 11.1. Статор асинхронного двигателя:
1 – станина; *2* – сердечник; *3* – обмотка

Трехфазная обмотка статора электродвигателя соединяется по схеме «звезда» или «треугольник» в зависимости от напряжения питания сети. Концы трехфазной обмотки могут быть соединены внутри электродвигателя (из двигателя выходит три провода), выведены наружу (выходит шесть проводов), выведены в распределительную коробку (в коробку выходит шесть проводов, из коробки – три).

В распределительной коробке, смонтированной на щитке машины, имеется шесть зажимов, к которым присоединяются начала и концы обмоток каждой фазы (рис. 11.2, *а*). Для подключения обмоток статора к трехфазной сети они могут быть соединены звездой или треугольником, что дает возможность включать двигатель в сеть с двумя различными линейными напряжениями. Например, двигатель может работать от сети с напряжением 220 и 127 В. На щитке машины указаны оба напряжения сети, на которые рассчитан двигатель, т. е. 220/127 В или 380/220 В.

Для более низких напряжений, указанных на щитке, обмотка статора соединяется треугольником, для более высоких – звездой.

При соединении обмотки статора треугольником (рис. 11.2, *в*) верхние зажимы объединяют перемычками с нижними, а каждую пару соединенных вместе зажимов подключают к линейным проводам трехфазной сети. Для включения звездой (рис. 11.2, *б*) три нижних зажима на щитке соединяют перемычками в общую точку, а верхние подключают к линейным проводам трехфазной сети.

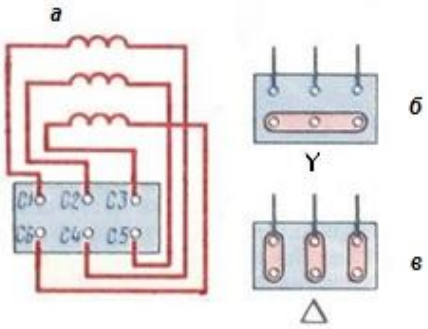


Рис. 11.2. Соединение обмоток статора:
а – выводы начал и концов фаз в распределительной коробке;
б – соединение способом «звезда»;
в – соединение способом «треугольник»

Сердечник ротора также набирают из стальных пластин толщиной 0,5 мм, изолированных лаком или окалиной для уменьшения потерь на вихревые токи. Пластины штампуют с впадинами и собирают в пакеты, которые крепят на валу машины. Из пакетов образуется цилиндр с продольными пазами, в которых укладывают проводники обмотки ротора. В зависимости от типа обмотки асинхронные машины могут быть с фазным и короткозамкнутым роторами (рис. 11.3).

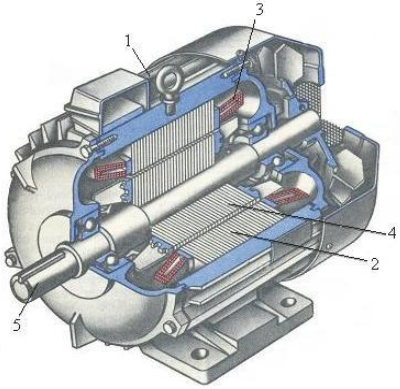


Рис. 11.3. Асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором в разрезе:
1 – станина; *2* – сердечник статора; *3* – обмотка статора;
4 – сердечник ротора с короткозамкнутой обмоткой; *5* – вал

Короткозамкнутая обмотка ротора выполняется по типу беличьего колеса (рис. 11.4, *а*). В пазах ротора (рис. 11.4, *б*) укладывают массивные стержни *3*, соединенные на торцовых сторонах медными кольцами *4*. Часто короткозамкнутую обмотку ротора изготовляют из меди, алюминия или латуни. Материал в горячем состоянии заливают в пазы сердечника *2* ротора под давлением. Такая обмотка всегда замкнута накоротко, и включение сопротивлений в нее невозможно.

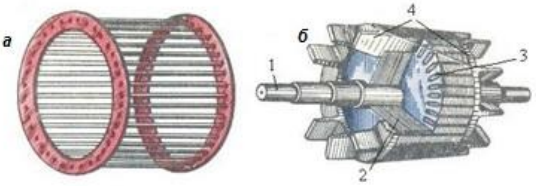


Рис. 11.4. Короткозамкнутый ротор:
а – беличье колесо; *б* – короткозамкнутая обмотка;
1 – вал; *2* – сердечник; *3* – стержни; *4* – кольца

Фазная обмотка ротора выполнена подобно статорной, т. е. проводники соответствующим образом соединяются между собой, образуя трехфазную систему (рис. 11.5). Обмотки трех фаз соединены звездой. Начала этих обмоток подключены к трем контактным медным кольцам *4*, укрепленным на валу ротора. Кольца изолированы друг от друга и от вала и вращаются вместе с ротором *3*. При вращении колец поверхности их скользят по металлографитным щеткам *5*, неподвижно укрепленным над кольцами. Обмотка ротора может быть замкнута на какое-либо сопротивление или накоротко при помощи указанных выше щеток.

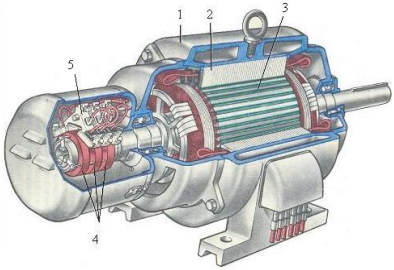


Рис. 11.5. Асинхронный двигатель с фазным ротором в разрезе:
1 – станина; *2* – обмотка статора; *3* – ротор;
4 – контактные кольца; *5* – щетки

Двигатели с короткозамкнутым ротором проще и надежнее в эксплуатации, значительно дешевле, чем двигатели с фазным ротором. Однако двигатели с фазным ротором обладают лучшими пусковыми и регулировочными свойствами.

В настоящее время асинхронные двигатели выполняют преимущественно с короткозамкнутым ротором и лишь при больших мощностях и в специальных случаях используют фазную обмотку ротора.

На рис. 11.6 приведено условное обозначение асинхронного двигателя с короткозамкнутым (*а*) и фазным (*б*) ротором.

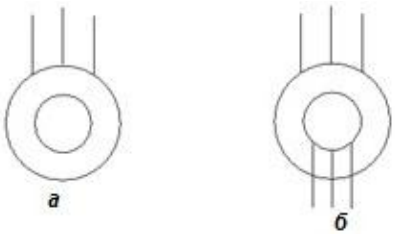


Рис. 11.6. Условные обозначения на электрических схемах асинхронного двигателя с короткозамкнутым (*а*) и фазным (*б*) ротором

Производят асинхронные двигатели мощностью от нескольких десятков ватт до 15 000 кВт при напряжениях обмотки статора до 6 кВ.

Между статором и ротором имеется воздушный зазор, величина которого оказывает существенное влияние на рабочие свойства двигателя.

Наряду с важными положительными качествами – простотой конструкции и обслуживания, малой стоимостью – асинхронный двигатель имеет и некоторые недостатки, из которых наиболее существенным является относительно низкий коэффициент мощности cos φ. У асинхронного двигателя cos φ при полной нагрузке может достигать значений 0,85–0,9; при недогрузках двигателя его cos φ резко уменьшается и при холостом ходе составляет 0,2–0,3.

Низкий коэффициент мощности асинхронного двигателя объясняется большим потреблением реактивной мощности, которая необходима для возбуждения магнитного поля. Магнитный поток в асинхронном двигателе встречает на своем пути воздушный зазор между статором и ротором, который в большой степени увеличивает магнитное сопротивление, а следовательно, и потребляемую двигателем реактивную мощность.

В целях повышения коэффициента мощности асинхронных двигателей воздушный зазор стремятся делать как можно меньшим, доводя его у малых двигателей (порядка 2–5 кВт) до 0,3 мм. В двигателях большой мощности воздушный зазор приходится увеличивать по конструктивным соображениям, но все же он не превышает 2–2,5 мм.

В паспорте двигателя указана частота вращения его ротора, которую двигатель развивает при номинальных значениях мощности и напряжения. Если двигатель работает вхолостую, частота вращения ротора приближается к частоте вращения магнитного поля.

Величина, которая характеризует отставание частоты вращения ротора от частоты вращения магнитного поля, называется скольжением. Ее обычно выражают в процентах и определяют по формуле (11.10).

Между мощностью двигателя P (Вт), угловой скоростью ω (рад/с), силой F (Н), радиусом шкива r (м) и вращающим моментом $M_{вр}$ (Н·м) существует следующая зависимость:

$$M_{вр} = \frac{P}{\omega} = Fr. \tag{11.1}$$

Тогда как угловая скорость ω определяется по формуле

$$\omega = \frac{2\pi n}{60}. \tag{11.2}$$

Значит имеем:

$$M_{вр} = \frac{P}{\omega} = \frac{P}{\frac{2\pi n}{60}} = \frac{60P}{2\pi n} = 9{,}554\frac{P}{n}. \tag{11.3}$$

Вращающий момент двигателя пропорционален квадрату приложенного напряжения, так как пропорциональны напряжению как магнитный поток, так и ток в роторе. Поэтому изменение напряжения в сети вызывает значительное изменение вращающего момента.

11.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципиальной электрической схемой лабораторной установки (рис. 11.7) и табл. 11.1 для записи результатов испытания асинхронного двигателя. Записать паспортные данные двигате-

ля, генератора и измерительных приборов.

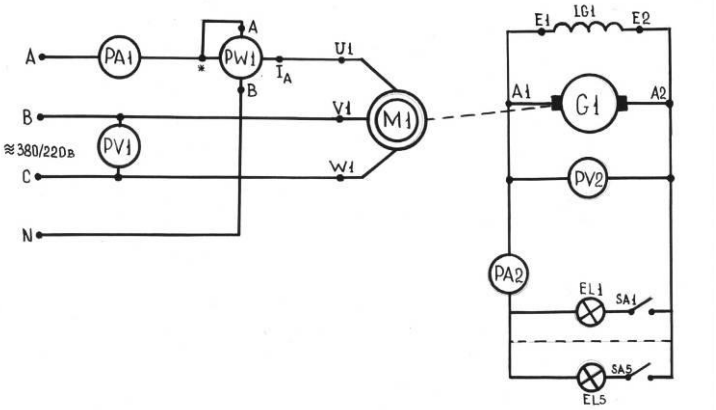


Рис. 11.7. Принципиальная электрическая схема испытания трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

Таблица 11.1. **Результаты испытания трехфазного асинхронного электродвигателя**

№ п.п.	Измеряемые величины					
	U_1, В	I_1, А	$P_ф$, Вт	$U_г$, В	$I_г$, А	n_2, об/мин
1	2	3	4	5	6	7
1						
2						
…						
6						

Продолжение табл. 11.1

№ п.п.	Вычисляемые величины					
	P_1, Вт	$P_г$, Вт	ΔP, Вт	cos φ	η, %	s, %
1	8	9	10	11	12	13
1						
2						
…						
6						

2. Собрать цепь в соответствии со схемой рис. 11.7 и после разрешения преподавателя включить ее в трехфазную сеть с номинальным

напряжением $U_н$ = 220/380 В и частотой $f_н$ = 50 Гц. Затем приступить к непосредственному испытанию двигателя, проведя для этой цели шесть опытов.

3. В первом опыте все выключатели *SA*1...*SA*5 находятся в разомкнутом положении (холостой ход агрегата). В табл. 11.1 записать показания измерительных приборов: линейный ток двигателя I_1 по амперметру *PA*1, линейное напряжение двигателя по вольтметру *PV*1, активную мощность одной фазы двигателя по ваттметру *PW*1, напряжение генератора $U_г$ по вольтметру *PV*2, ток генератора $I_г$ по амперметру *PA*2, частоту вращения ротора двигателя n_2 по тахометру.

Постепенно увеличивая нагрузку на двигатель выключателями *SA*1...*SA*5, провести остальные пять опытов, и записать результаты в табл. 11.1.

4. По результатам проведенных опытов вычислить и записать в табл. 11.1 следующие величины: активную мощность двигателя P_1, мощность генератора $P_г$, мощность активных потерь в агрегате ΔP, коэффициент активной мощности двигателя cos φ, коэффициент полезного действия агрегата η, скольжение двигателя *s*.

Построить в соответствующих масштабах следующие рабочие характеристики агрегата и двигателя: $\eta = f_1(P_г/P_{гн})$, $\Delta P = f_2(P_г/P_{гн})$, $\cos\varphi = f_3(P_1/P_{1н})$, $I_1 = f_4(P_1/P_{1н})$, $s = f_5(P_1/P_{1н})$.

11.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [1, 2, 5, 6].

2. Записать паспортные данные электродвигателя и проанализировать его номинальные параметры.

3. Изучить на лабораторном стенде устройство, основные узлы и детали трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

11.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Активная мощность двигателя P_1 определяется по формуле

$$P_1 = 3P_Ф. \qquad (11.4)$$

Номинальная активная мощность двигателя $P_{1н}$ может быть вычис-

лена по формуле

$$P_{1н} = \sqrt{3} \cdot U_{1н} \cdot I_{1н} \cdot \cos\varphi_н, \qquad (11.5)$$

где $U_{1н}$ – номинальное линейное напряжение двигателя, В;

$I_{1н}$ – номинальный линейный ток двигателя, А;

$\cos\varphi_н$ – номинальный коэффициент активной мощности двигателя.

2. Мощность генератора постоянного тока $P_г$ определяется по формуле

$$P_г = U_г \cdot I_г, \qquad (11.6)$$

где $U_г$ – напряжение на клеммах генератора, В;

$I_г$ – ток нагрузки генератора, А.

Мощность ΔP активных потерь в агрегате определяется по формуле

$$\Delta P = P_1 - P_г. \qquad (11.7)$$

3. Коэффициент активной мощности двигателя $\cos\varphi$ вычисляется по формуле

$$\cos\varphi = \frac{P_1}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot I_1}. \qquad (11.8)$$

4. Коэффициент полезного действия агрегата (КПД) вычисляется по следующей формуле:

$$\eta = \frac{P_г}{P_1} = \frac{P_г}{P_г + \Delta P} = \eta_д \cdot \eta_г, \qquad (11.9)$$

где $\eta_д$ – КПД двигателя;

$\eta_г$ – КПД генератора.

5. Скольжение (относительное отставание ротора от вращающего его магнитного поля статора) определяется по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \cdot 100, \ \%, \qquad (11.10)$$

где n_1 – частота вращения магнитного поля обмоток статора двигателя (n_1=1500 об/мин);

n_2 – частота вращения ротора, об/мин.

5. При построении рабочих характеристик агрегата по оси абсцисс откладывается относительная мощность генератора $P_г$ / $P_{гн}$, изменяю-

щаяся в пределах $0 \le P_г / P_{гн} \le 1$. По оси абсцисс необходимо откладывать значения $P_г / P_{гн} = 0; 0{,}1; 0{,}2; 0{,}4; 0{,}6; 0{,}8; 1{,}0$. Рабочие характеристики агрегата можно строить в одной системе координат, но обязательно с двумя осями ординат, каждая со своей величиной и масштабом.

При построении рабочих характеристик двигателя по оси абсцисс откладывается его относительная электрическая мощность $P_1 / P_{1н}$, изменяющаяся в пределах $0 \le P_1 / P_{1н} \le 1$. При совмещении рабочих характеристик двигателя на одном графике необходимо провести три оси ординат: для коэффициента мощности $\cos \varphi$, для тока I_1 и скольжения s.

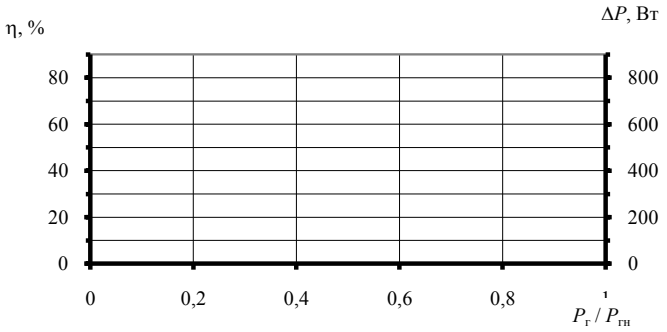
11.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить физический смысл рабочих характеристик (по графикам) двигателя и агрегата.
2. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного двигателя.
3. Что произойдет при работе нагруженного двигателя, если напряжение питающей сети уменьшится на 10 % (увеличится на 10 %)?
4. Будет ли продолжать нормально работать нагруженный двигатель при обрыве одного из трех проводов питающей сети?
5. Двигатель плохо идет в ход и сильно гудит, сила тока во всех трех фазах различна и при холостом ходе двигателя превышает номинальную. Поясните возможные причины данного явления.
6. От каких величин зависит частота вращения вала двигателя и его вращающий момент?
7. Какие вам известны положительные и отрицательные характеристики трехфазного асинхронного двигателя?

11.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Записать название и цель лабораторной работы.
2. Вычертить схему (см. рис. 11.7).
3. Записать пункт 11.1.
4. Снятые показания и полученные расчеты свести в табл. 11.1.
5. На основании полученных данных построить рабочие характеристики агрегата «двигатель – генератор» и асинхронного электродвигателя (рис. 11.8).

Рабочие характеристики агрегата «двигатель – генератор»
$\eta = f_1(P_г/P_{гн})$, $\Delta P = f_2(P_г/P_{гн})$



Рабочие характеристики асинхронного электродвигателя:
$\cos\varphi = f_3(P_1/P_{1н})$, $I_1 = f_4(P_1/P_{1н})$, $s = f_5(P_1/P_{1н})$

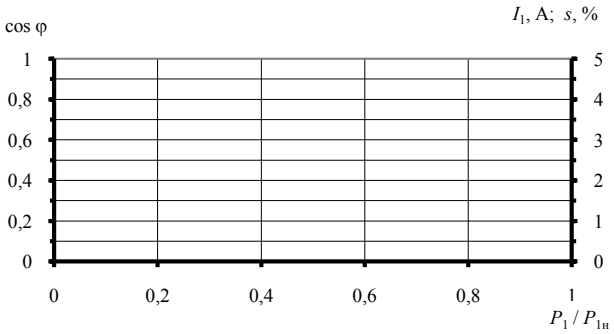


Рис. 11.8. Порядок построения рабочих характеристик лабораторной установки

Лабораторная работа № 12. ИСПЫТАНИЕ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

Цели работы: 1. Изучить назначение, паспортные данные, устройство, принцип действия и области применения синхронного генератора.

2. Изучить основные рабочие характеристики синхронного генератора и получить их экспериментально на лабораторной установке.

12.1. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

На рабочем месте смонтирована лабораторная установка, объектом исследования на которой является трехфазный синхронный генератор типа СГ. Номинальные напряжения генератора при соединении обмоток способом «звезда» $U_л/U_ф = 250/132$ В, номинальный ток $I_н = I_л = 11{,}2$ А, частота вращения $n = 1500$ об/мин, частота тока $f = 50$ Гц, коэффициент полезного действия $\eta_н = 80$ %, полная мощность $S_н = 4{,}5$ кВ·А, активная мощность $P_н = 3{,}6$ кВт, коэффициент активной мощности $\cos\varphi = 0{,}8$, масса $m = 124$ кг.

Питание обмотки возбуждения синхронного генератора осуществляется от дополнительного генератора постоянного тока с самовозбуждением (возбудителя), который смонтирован в одном корпусе с основным генератором. Напряжение постоянного тока возбудителя $U_н = 22$ В, ток возбудителя $I_н = 11{,}2$ А.

Приводным двигателем для синхронного генератора и возбудителя в лабораторной установке служит асинхронный трехфазный двигатель типа А2, мощность на валу которого $P_н = 5{,}5$ кВт, номинальный ток $I_н = 11{,}1$ А, напряжение $U_л/U_ф = 380/220$ В, номинальная частота вращения $n = 1440$ об/мин, коэффициент полезного действия $\eta_н = 87$ %, коэффициент активной мощности $\cos\varphi = 0{,}86$.

Средствами исследования служат следующие электроизмерительные приборы: вольтметры *PV*1 и *PV*2 электромагнитной системы типа Э59 (напряжение $U_н = 75...600$ В), амперметр *PA*1 электромагнитной системы типа Д566 (ток $I_н = 5$ и 10 А), регулировочный реостат *RR*1 (сопротивление $R = 50$ Ом).

Для измерения нагрузки на генератор в составе лабораторной установки имеются лампы накаливания *EL*1...*EL*4, мощность каждой из них $P_н = 200$ Вт, напряжение $U_н = 220$ В, а также трехфазные трехполюсные выключатели *SA*1...*SA*4.

12.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О СИНХРОННЫХ ГЕНЕРАТОРАХ

В синхронных машинах частота вращения ротора равна частоте вращения магнитного поля статора и, следовательно, определяется частотой тока в сети и числом пар полюсов, т.е.

$$n = \frac{60\,f}{p}. \qquad (12.1)$$

Обычно обмотки возбуждения получают энергию от возбудителя, который представляет собой генератор постоянного тока. Возбудитель находится на одном валу с рабочей машиной, и мощность его составляет малую величину, порядка 1…5 % мощности синхронной машины, возбуждаемой им. При небольшой мощности часто используются схемы питания обмоток возбуждения синхронных машин от сети переменного тока через полупроводниковые выпрямители.

Простейшим генератором может быть виток из провода *1* и *2*, вращающийся в магнитном поле (рис. 12.1). Магнитное поле возбуждается током обмотки возбуждения, помещенной на полюсах статора *N*...*S*.

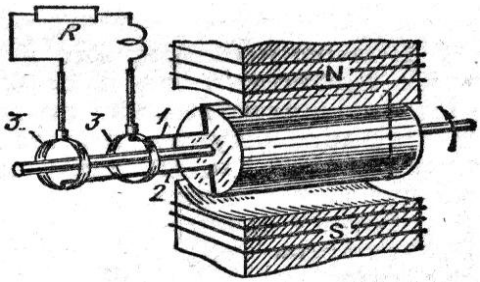


Рис. 12.1. Схема генератора переменного тока:
1 и *2* – проводники; *3* – кольца

При вращении витка проводники *1* и *2* пересекают магнитное поле, созданное между полюсами *N*...*S*, вследствие чего в витке будут индуктироваться ЭДС.

Концы витка соединены с кольцами *3*, вращающимися вместе с витком. Если на кольцах поместить неподвижные щетки и соединить их с приемником электрической энергии, то по замкнутой цепи, состоящей из витка, колец, щеток и приемника энергии, пойдет электрический ток под действием ЭДС.

Полученная в таком простейшем генераторе ЭДС будет непрерывно изменяться в зависимости от положения витка в магнитном поле. Когда проводники *1* и *2* находятся под осями полюсов, то при вращении витка они пересекают в единицу времени наибольшее число линий магнитного поля. Следовательно, в данный момент индуктируемая в витке ЭДС будет иметь наибольшее значение.

В дальнейшем при повороте витка изменится число линий магнитного поля, пересекаемых в единицу времени проводниками *1* и *2*. При

повороте витка на 90º в пространстве проводники будут перемещаться в вертикальном направлении, совпадающем с направлением магнитных линий поля. Следовательно, проводники *1* и *2* не пересекают магнитных линий и ЭДС в витке равна нулю.

При повороте витка на угол, больший 90º, изменится направление перемещения этих проводников в магнитное поле, а следовательно, и направление ЭДС, индуктируемой в витке.

Если магнитное поле между полюсами *N* и *S* распределяется равномерно, то ЭДС будет меняться во времени синусоидально. За один оборот витка в пространстве ЭДС, индуктируемая в нем, претерпевает один период изменения.

Если виток вращается при помощи какого-либо первичного двигателя с постоянной частотой вращения n в минуту, то в этом витке индуктируется переменная ЭДС с частотой, определяемой по формуле

$$f = \frac{n}{60}. \qquad (12.2)$$

Возникновение ЭДС в проводниках возможно как при перемещении этих проводников в неподвижном магнитном поле, так и при перемещении магнитного поля относительно неподвижных проводников. В первом случае полюсы, т.е. индуктирующая часть машины, возбуждающая магнитное поле, помещаются на неподвижной части машины (на статоре), а индуктируемая часть (якорь), т.е. проводники, в которых создается ЭДС, – на вращающейся части машины (на роторе). Во втором случае полюсы помещаются на роторе, а якорь – на статоре.

Выше мы рассмотрели принцип действия синхронного генератора с неподвижными полюсами и вращающимся якорем. В таком генераторе энергия, вырабатываемая им, передается приемнику энергии посредством скользящих контактов – контактных колец и щеток. Скользящий контакт в цепи большой мощности создает значительные потери энергии, а при высоких напряжениях наличие такого контакта крайне нежелательно. Поэтому такие генераторы применяют только при невысоких напряжениях (380/220 В) и небольших мощностях.

Наиболее широкое применение получили синхронные генераторы, в которых полюсы размещены на роторе, а якорь – на статоре.

Ток возбуждения протекает по обмотке возбуждения, которая представляет собой последовательно соединенные катушки, помещенные на полюсы ротора.

Концы обмотки возбуждения соединены с контактными кольцами,

которые крепятся на валу машины. На кольцах помещаются неподвижные щетки, посредством которых в обмотку возбуждения подводится постоянный ток от постороннего источника энергии – генератора постоянного тока, называемого возбудителем.

На рис. 12.2 показан общий вид синхронного генератора с возбудителем. Устройство статора синхронного генератора аналогично устройству статора асинхронной машины.

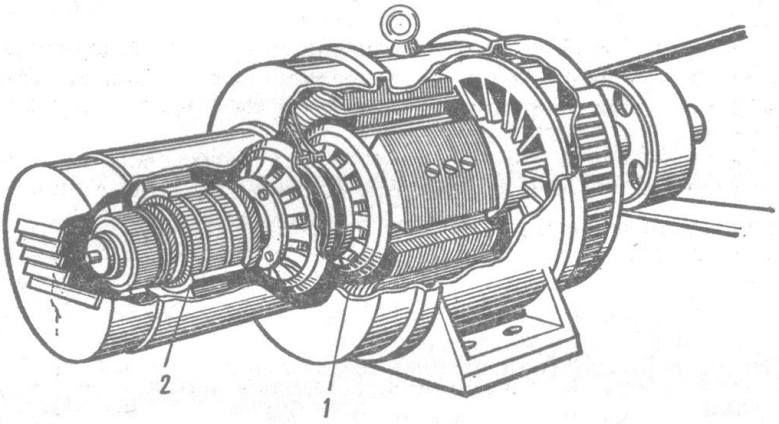


Рис. 12.2. Устройство синхронного генератора:
1 – синхронный генератор; *2* – возбудитель

Ротор синхронных генераторов выполняют либо с явно выраженными (выступающими) полюсами, либо с неявно выраженными полюсами, т.е. без выступающих полюсов.

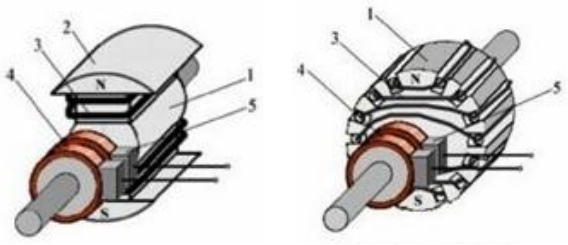
В машинах с относительно малой частотой вращения (при большом числе полюсов) роторы должны быть с явно выраженными полюсами (рис. 12.3, *а*), равномерно расположенными по окружности ротора.

Полюс состоит из сердечника, полюсного наконечника и катушки обмотки возбуждения, помещаемой на сердечнике полюса.

При большой частоте вращения такое устройство ротора не может обеспечить нужной механической прочности, и поэтому у высокоскоростных машин роторы выполняют с неявно выраженными полюсами (рис. 3, *б*).

Сердечники роторов с неявно выраженными полюсами обычно изготовляют из цельных поковок, на поверхности которых фрезеруются

пазы. После укладки обмоток возбуждения на роторе пазы его забиваются клиньями, а лобовые соединения обмотки возбуждения укрепляются стальными бандажами, помещенными на торцовых частях ротора.



а *б*

Рис. 12.3. Ротор синхронной машины
а – явнополюсный; *б* – неявнополюсный;
1 – магнитопровод; *2* – полюса; *3* – обмотка возбуждения;
4 – контактные кольца; *5* – электрические щетки

В обмотке статора синхронного генератора создается ЭДС, величина которой зависит от магнитного потока полюсов. Если магнитный поток полюсов очень мал, то и ЭДС также мала. При увеличении магнитного потока возрастает и ЭДС машины. Таким образом, при постоянной частоте вращения ротора ЭДС пропорциональна магнитному потоку, который возбуждается постоянным током, протекающим по проводникам обмотки возбуждения. Если повысить ток в обмотке возбуждения, то возрастет и магнитный поток полюсов, что вызовет увеличение ЭДС машины. Следовательно, изменение тока в обмотке возбуждения вызывает соответствующее изменение ЭДС машины и позволяет регулировать напряжение на зажимах генератора.

На рис. (12.4, *а*) изображены внешние характеристики синхронного генератора при активной и реактивной нагрузках. Эти характеристики показывают зависимость напряжения на зажимах генератора от тока нагрузки при неизменных частоте вращения ротора и токе возбуждения. Различный вид этих характеристик при активной, индуктивной и емкостной нагрузках объясняется неодинаковым воздействием поля реакции якоря на магнитный поток полюсов.

Для нормальной работы любого приемника электрической энергии требуется постоянное напряжение сети. Чтобы обеспечить постоянное напряжение сети при изменении нагрузки в синхронном генераторе, изменяют ток возбуждения.

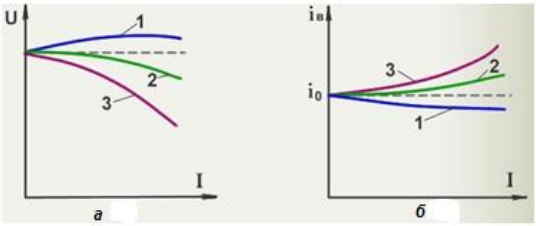


Рис. 12.4. Характеристики синхронного генератора:
а – внешние; *б* – регулировочные;
1 – емкостная; *2* – активная; *3* – индуктивная

Зависимость, показывающая, каким образом необходимо изменить ток в обмотке возбуждения для того, чтобы при изменении нагрузки генератора напряжение на его зажимах оставалось неизменным, называется регулировочной характеристикой (рис. 12.4, *б*).

При активной нагрузке увеличение тока в статоре вызывает незначительное понижение напряжения, так как реакция якоря уменьшает магнитный поток в малой степени. При этой нагрузке требуется незначительно увеличить ток возбуждения для увеличения постоянства напряжения. При индуктивной нагрузке создается размагничивающее поле реакции якоря, уменьшающее поток полюсов. Поэтому для постоянства напряжения (т.е. для постоянства результирующего магнитного потока) необходимо в большей мере увеличить ток возбуждения для компенсации размагничивающего поля реакции якоря. При емкостной нагрузке происходит усиление магнитного поля, и для постоянства напряжения следует уменьшить ток возбуждения при увеличении тока в статоре.

12.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Ознакомиться с принципиальной электрической схемой лабораторной установки (рис. 12.5) и табл. 12.1...12.3 для записи результатов опытов и вычислений. Записать паспортные данные синхронного генератора *G*2, возбудителя *G*1 и приводного двигателя *M*1. Записать также паспортные данные измерительных приборов.

2. Собрать цепь для испытания генератора по схеме рис. 12.5 и после разрешения преподавателя включить ее в сеть с напряжением 380/220 В. Приступить к проведению опыта холостого хода синхронного генератора. Для этого при токе нагрузки, равном нулю (выключа-

тели *SA*1...*SA*4 разомкнуты), постепенно увеличивать ток возбуждения $I_в$ от нуля до 10 А с шагом 2 А. По амперметру *PA*1 измерять значения тока $I_в$, а по вольтметру *PV*2 – соответствующие значения электродвижущей силы E фазы A синхронного генератора и записать их в верхнюю строку табл. 12.1. Затем необходимо уменьшать ток возбуждения $I_в$ от 10 А до нуля с тем же шагом и записать значения ЭДС E_A в нижнюю строку табл. 12.1.

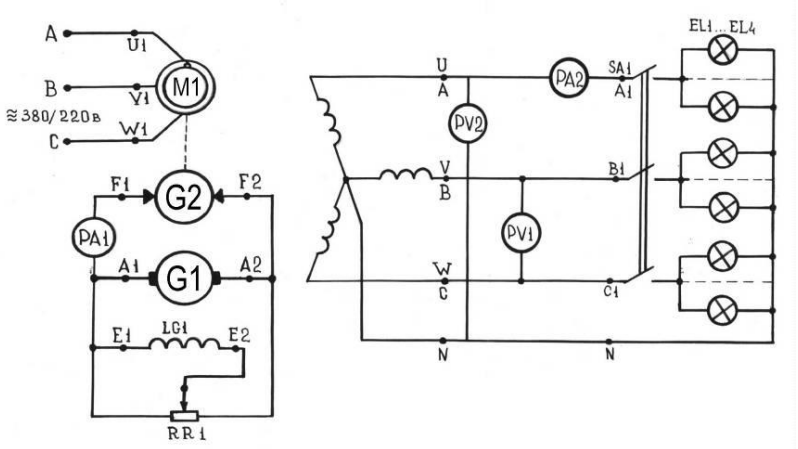


Рис. 12.5. Принципиальная электрическая схема испытания трехфазного синхронного генератора

Таблица 12.1. **Результаты опыта холостого хода генератора**

$I_в$, А						
E_A, В						

Таблица 12.2. **Результаты испытания генератора под нагрузкой**

№ п.п.	Измеряемые величины					Вычисляемые величины					
	U_{BC}, В	U_A, В	I_A, А	$I_в$, А	n, об/мин	Z_A, Ом	$R_{нA}$, Ом	X_A, Ом	ψ_A, град.	$P_{эм}$, Вт	P, Вт
1											
2											
3											
4											
5											

Таблица 12.3. **Результаты снятия регулировочной характеристики генератора**

U_A, В					
I_A, А					
$I_в$, А					

По результатам проведения опыта построить характеристику холостого хода генератора $E_A = f(I_н)$ при токе нагрузки $I_A = 0$ и частоте вращения n = const.

3. Для снятия внешней характеристики синхронного генератора необходимо провести пять опытов, обеспечивая при каждом из них $I_в = 8$ А и n = const, при этом увеличивая нагрузку генератора (ток I_A) выключателями *SA*1...*SA*4. В табл. 12.2 следует записать результаты измерений: линейное напряжение U_{BC} по вольтметру *PV*1, фазное напряжение генератора U_A по вольтметру *PV*2, ток возбуждения $I_в$ по амперметру *PA*1, частоту вращения генератора n по тахометру.

По результатам опытов построить внешнюю (нагрузочную) характеристику генератора $U_A = f(I_A)$. Для одного из режимов генератора вычислить полное суммарное сопротивление фазы генератора и фазы потребителя Z_A, активное сопротивление фазы потребителя $R_{нA}$, индуктивное сопротивление фазы генератора X_A, угол ψ_A между вектором ЭДС генератора E_A и вектором тока I_A.

Вычислить также электромагнитную мощность генератора $P_{эм}$ и активную мощность P, которую генератор отдает потребителю.

4. Провести опыт для получения регулировочной характеристики синхронного генератора, для чего также необходимо выполнить пять опытов с постепенным увеличением нагрузки на генератор выключателями *SA*1...*SA*4. При каждом опыте необходимо поддерживать напряжение генератора U_A = const (по указанию преподавателя) ползунком реостата *RR*1. Результаты измерений записать в табл. 12.3. По результатам опытов построить регулировочную характеристику генератора $I_в = f(I_A)$.

5. По результатам испытаний синхронного генератора составить принципиальную схему замещения одной фазы синхронного генератора и фазы потребителя, с целью ее упрощения можно пренебречь активным сопротивлением фазы генератора. Для составленной схемы замещения необходимо построить векторную диаграмму токов, напряжений и магнитных потоков (см. рис. 12.6, 12.7 и 12.8).

12.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [1, 2, 5–7].

2. Записать паспортные данные генератора и приводного двигателя и проанализировать их.

3. Изучить на лабораторном стенде устройство, основные узлы и детали синхронного генератора.

12.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Полное сопротивление Z_A фазы генератора и потребителя определяется по формуле

$$Z_A = E_A / I_A, \tag{12.3}$$

где E_A – электродвижущая сила фазы A генератора, В;

I_A – ток фазы A генератора, А.

Активное сопротивление $R_{нA}$ фазы A потребителя (если пренебречь активным сопротивлением фазы генератора) определяется по формуле

$$R_{нA} = U_A / I_A \tag{12.4}$$

Индуктивное сопротивление X_A фазы генератора вычисляется по следующей формуле:

$$X_A = \sqrt{Z_A^2 - R_{нA}^2}\,. \tag{12.5}$$

Угол ψ_A между вектором ЭДС генератора E_A и вектором тока I_A вычисляется по формуле

$$\psi_A = \operatorname{arctg}\frac{X_A}{R_{нA}}. \tag{12.6}$$

Электромагнитная мощность $P_{эм}$, вырабатываемая генератором, определяется по формуле

$$P_{эм} = 3E_A \cdot I_A \cdot \cos\psi_A\,. \tag{12.7}$$

Активная мощность P, отдаваемая генератором потребителю, определяется по следующей формуле:

$$P = 3U_A \cdot I_A \cdot \cos\varphi_A , \qquad (12.8)$$

где φ_A – угол между вектором напряжения потребителя U_A и вектором тока I_A (если нагрузкой являются лампы накаливания, то угол $\varphi_A = 0°$).

2. Схему замещения фазы генератора и потребителя (рис. 12.9) можно представить в виде схемы простой цепи с последовательным соединением источника переменной синусоидальной ЭДС с внутренним сопротивлением X_A и резистивного сопротивления ламповой нагрузки $R_{нA}$. Векторная диаграмма для схемы замещения (рис. 12.10) строится на основании уравнения, составленного для этой схемы в соответствии со вторым законом Кирхгофа:

$$\overrightarrow{E_A} = \overrightarrow{I_A R_{нA}} + \overrightarrow{I_A X_A} = \overrightarrow{U_A} + \overrightarrow{I_A X_A} . \qquad (12.9)$$

Вектор E_A опережает вектор тока I_A на угол ψ_A, а векторы тока I_A и напряжения U_A параллельны между собой. На векторной диаграмме необходимо построить векторы магнитного потока возбуждения $\Phi_в$, реакции якоря Φ_A и суммарного потока генератора Φ. Векторная диаграмма магнитных потоков строится на основании уравнения

$$\vec{\Phi} = \vec{\Phi}_A + \vec{\Phi}_B . \qquad (12.10)$$

Вектор магнитного потока $\Phi_в$ опережает вектор ЭДС E_A на угол 90°, вектор потока Φ_A совпадает с направлением вектора тока I_A.

12.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Объяснить физический смысл построенных рабочих характеристик синхронного генератора.
2. Почему у синхронного генератора основной магнитный поток возбуждения создается обмотками вращающегося ротора генератора, а ЭДС снимается с неподвижных обмоток якоря, а не наоборот?
3. Какие показатели качества электрической энергии, вырабатываемой синхронным генератором, вам известны?
4. Какие способы регулирования электродвижущей силы генератора вам известны?
5. Изменятся ли рабочие характеристики синхронного генератора, если его нагрузка будет чисто индуктивной (или емкостной)?

12.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЕТА

1. Записать название и цель лабораторной работы.
2. Вычертить схему (см. рис. 12.5).
3. Записать пункт 12.1.
4. Снятые показания и полученные расчеты свести в табл. 12.1…12.3.
5. На основании полученных данных построить рабочие характеристики синхронного генератора (рис. 12.6, 12.7 и 12.8).

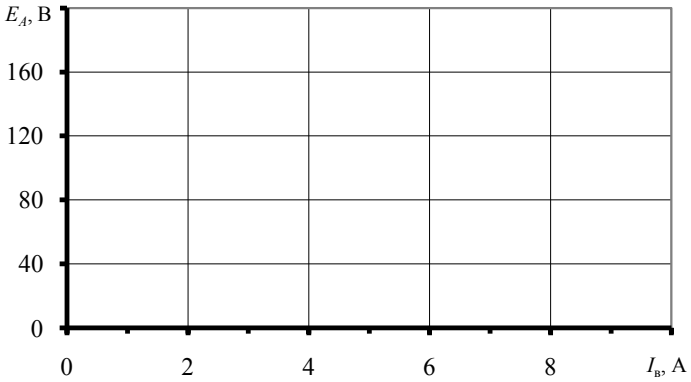


Рис. 12.6. Характеристика холостого хода синхронного генератора: $E_A = f_1 (I_В)$ при n = const, I_A = const

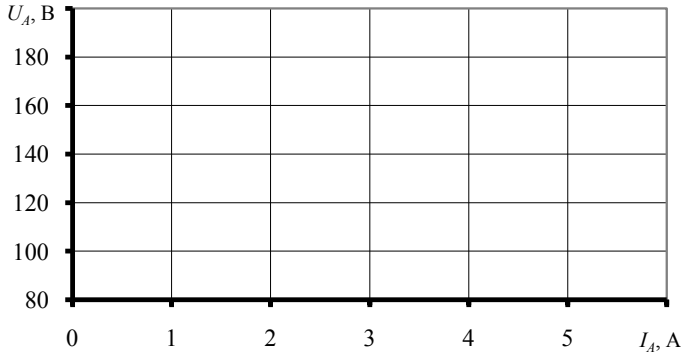


Рис. 12.7. Внешняя (нагрузочная) характеристика синхронного генератора: $U_A = f_2 (I_A)$ при E_A = const, $I_в$ = const, n = const

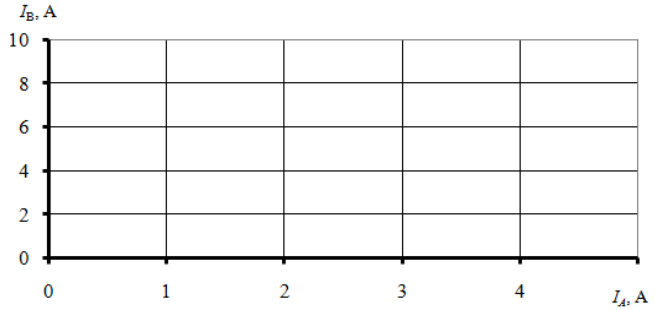


Рис. 12.8. Регулировочная характеристика синхронного генератора: $I_в = f_3\,(I_A)$ при U_A = const, n = const

6. Построить схему замещения фазы синхронного генератора и векторную диаграмму магнитных потоков и напряжений (рис. 12.9 и 12.10).

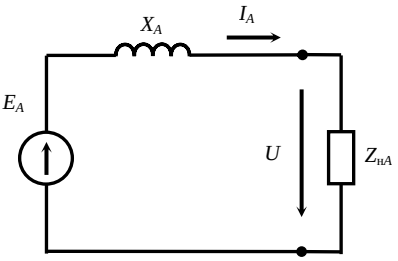


Рис. 12.9. Схема замещения фазы *A* синхронного генератора

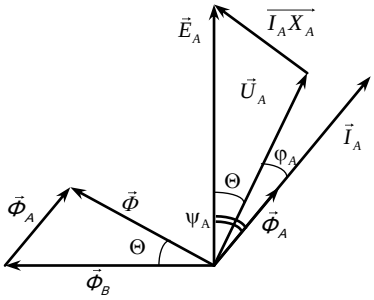


Рис. 12.10. Векторная диаграмма магнитных потоков и напряжений синхронного генератора

Лабораторная работа № 13.
ИССЛЕДОВАНИЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДОВ

Цели работы: 1. Снятие и анализ вольтамперных характеристик выпрямительного диода и стабилитрона, расчёт статических параметров приборов.

2. Приобретение навыков работы с диодами и аппаратурой, используемой при исследовании характеристик и измерении параметров приборов.

3. Приобретение навыков работы со справочной литературой по полупроводниковым диодам.

13.1. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являются полупроводниковые диоды. К средствам исследования относятся центральный процессор *PU*–2000, печатная плата *EB*–121, цифровой универсальный прибор, осциллограф.

13.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ПОЛУПРОВОДНИКОВЫХ ДИОДАХ

Полупроводниковый диод (вентиль) представляет собой контактное соединение двух полупроводников, один из которых с электронной проводимостью (*n*-типа), а другой – с дырочной (*p*-типа, рис. 13.1, *а*).

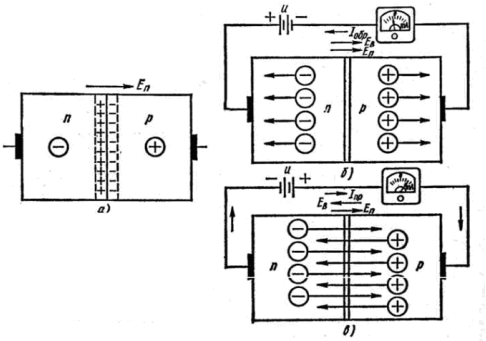


Рис. 13.1. Полупроводниковый вентиль и его схема включения:
а – общий вид; *б* – схема включения в обратном направлении;
в – схема включения в прямом направлении

Вследствие большой концентрации электронов в полупроводнике *n* будет происходить диффузия их из первого полупроводника во второй. Аналогично будет происходить диффузия дырок из второго полупроводника *p*-типа в первый *n*-типа. В тонком пограничном слое полупроводника *n*-типа возникает положительный заряд, а в пограничном слое полупроводника *p*-типа – отрицательный заряд. Между этими слоями возникает разность потенциалов (потенциальный барьер) и образуется электрическое поле с некоторой напряженностью, которая препятствует диффузии электронов и дырок из одного полупроводника в другой. Таким образом, на границе двух полупроводников возникает тонкий слой, обедненный носителями зарядов (электронов и дырок) и обладающий большим сопротивлением. Этот слой называется запирающим *p*-*n*-переходом.

Вследствие теплового движения в электрическое поле *p*-*n*-перехода попадают неосновные носители зарядов (электроны из *p*-области и дырки из *n*-области). Движение неосновных носителей зарядов под действием сил поля *p*-*n*-перехода направлено встречно диффузионному току основных носителей и называется дрейфовым или тепловым током, зависящим в сильной степени от температуры. При отсутствии внешнего электрического поля дрейфовый ток уравновешивается диффузионным и суммарный ток через *p*-*n*-переход равен нулю.

Соединив положительный зажим источника питания с металлическим электродом полупроводника *n*-типа, а отрицательный зажим с электродом полупроводника *p*-типа, получим внешнее электрическое поле, направленное согласно с полем *p*-*n*-перехода, усиливающее его (рис. 13.1, *б*). Такое поле еще больше будет препятствовать прохождению основных носителей зарядов через запирающий слой и через диод пройдет малый обратный ток, обусловленный неосновными носителями заряда. Обратный ток диода в значительной мере зависит от температуры, увеличиваясь с ее повышением.

При изменении полярности источника питания (рис. 13.1, *в*) внешнее электрическое поле окажется направленным встречно полю *p*-*n*-перехода и под действием этого поля электроны и дырки начнут двигаться навстречу друг другу и число основных носителей заряда в переходном слое возрастет, уменьшая потенциальный барьер и сопротивление переходного слоя.

Таким образом, в цепи устанавливается прямой ток, который будет значительным даже при относительно небольшом напряжении источника питания.

При небольшом прямом напряжении (1 В) на зажимах диода в его цепи проходит относительно большой ток, а при значительных обратных напряжениях ничтожно мал.

Таким образом, полупроводниковый диод обладает односторонней проводимостью, т. е. является электрическим вентилем. Промышленность производит электрические вентили германиевые, кремниевые, селеновые и меднозакисные. Германиевые и кремниевые вентили изготовляют двух типов: точечные и плоскостные.

У точечного германиевого диода помещен кристалл германия с электронной проводимостью, в который острием входит контактный пружинящий вывод анода. Под контактным острием в результате специальной термической обработки создается область с дырочной проводимостью.

В плоскостном германиевом диоде на пластину германия с электронной проводимостью накладывается таблетка из индия, которая в процессе изготовления диода нагревается до 500°С и плавится так, что ее атомы диффундируют в германий, образуя область с дырочной проводимостью.

На границе двух областей (с электронной и дырочной проводимостью) появляется запирающий *p*-*n*-переход.

Как в точечном, так и в плоскостном диоде германий припоем укреплен на кристаллодержателе, к которому приварен вывод катода. Вывод анода также припоем укрепляется в области с дырочной проводимостью и выводится наружу в верхней части диода. Металлический корпус сварен с кристаллодержателем и стеклянным изолятором.

Кремниевые диоды отличаются от германиевых не только материалом полупроводника, но и некоторыми преимуществами, а именно: более высокой предельной температурой, много меньшим обратным током, более высоким пробивным напряжением.

Однако сопротивление кремниевого вентиля в прямом направлении значительно больше чем германиевого.

Селеновый вентиль состоит из алюминиевого диска, с одной стороны покрытого слоем кристаллического селена, обладающего дырочной проводимостью, который служит одним электродом. Другим электродом является нанесенный на селен слой сплава кадмия и олова, при диффузии из которого атомов кадмия в селен образуется слой) обладающий электронной проводимостью. Селеновые вентили имеют значительно меньшие обратные напряжения (до 60 В) и плотности тока, чем германиевые и кремниевые, так что их габариты и масса значи-

тельно больше.

Однако характеристики селеновых вентилей более стабильны, что позволяет соединять их последовательно и параллельно для увеличения обратных напряжений и прямых токов. Кроме того, селеновые вентили обладают свойством самовосстановления, которое сводится к следующему: если через пробитую шайбу пропустить большой ток, то селен нагревается и плавится, закрывая место пробоя и восстанавливая вентильное свойство диода.

Меднозакисный вентиль состоит из медного диска со слоем закиси меди, к которому прилегает для получения хорошего контакта свинцовый диск с латунным радиатором большого диаметра. Слой закиси меди образуется при термической обработке меди в атмосфере кислорода. Наружный слой закиси меди, полученный при избытке кислорода, обладает дырочной проводимостью, а слой закиси, полученной при недостатке кислорода, электронной проводимостью. Между этими двумя слоями закиси меди возникает *p*-*n*-переход.

Меднозакисные вентили имеют низкие обратные напряжения (10 В) и плотности тока (0,1 А/см^2) и в преобразовательных устройствах не используются. Их применение ограничено измерительными приборами в силу стабильности их характеристик.

13.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять и построить вольтамперную характеристику (ВАХ) выпрямительного диода.

Собрать схему по рис. 13.2.

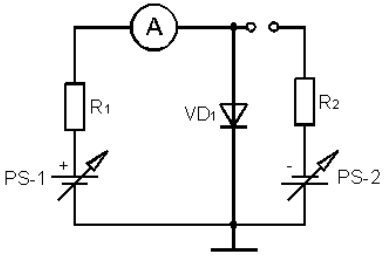


Рис. 13.2. Схема подключения диода в прямом направлении

Снять прямую ветвь ВАХ диода $I_д = f(U_д)$.

Результаты измерений записать в таблицу 13.1.

Таблица 13.1. **Данные для построения прямой ветви ВАХ выпрямительного диода**

$U_{PS\text{-}1}$, В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
U, В											
I, мА											

Собрать схему по рисунку 13.3. Снять обратную ветвь ВАХ выпрямительного диода. Результаты измерений записать в таблицу 13.2.

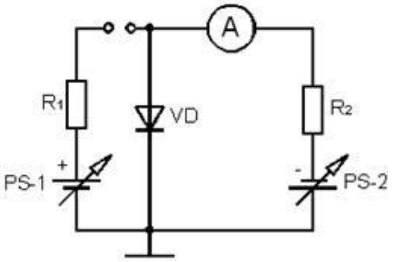


Рис. 13.3. Схема подключения диода в обратном направлении

Таблица 13.2. **Данные для построения обратной ветви ВАХ выпрямительного диода**

$U_{PS\text{-}2}$, В	–1	–2	–3	–4	–5	–6	–7	–8	–9	–10
U, В										
I, мА										

Построить ВАХ диода. Прямую и обратную ветвь диода строить на одном графике (можно использовать разные масштабы токов).

2. Снять и построить обратную ветвь ВАХ стабилитрона.

Собрать схему по рисунку 13.4. Снять обратную ветвь ВАХ стабилитрона $I_{ст} = f(U_{ст})$ и результаты измерений записать в таблицу 13.3.

Таблица 13.3. **Данные для построения ВАХ стабилитрона**

$U_{вх}$, В	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$U_{ст.}$, В											
$I_{ст.}$, мА											

По результатам измерений построить обратную ветвь ВАХ стабилитрона $I_{ст.}=f(U_{ст.})$.

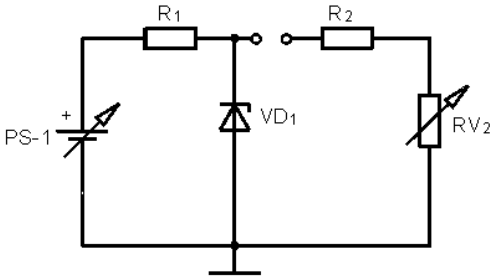


Рис. 13.4. Схема подключения стабилитрона

3. Исследовать влияние нагрузки $R_н$ на напряжение стабилизации.

Для исследования влияния снять зависимость $U_{ст.} = f(U_{вх.})$ для разных значений $R_н$, которое представляет собой последовательное соединение R_1 и R_{V2} и замеряется с помощью омметра при отсоединённой схеме стабилитрона. Изменением сопротивления потенциометра R_{V2} последовательно выставлять 5 значений $R_н$ (800 Ом, 500 Ом, 200 Ом и 100 Ом) и результаты измерений записать в таблицу 13.4.

Таблица 13.4. **Результаты влияния нагрузки $R_н$ на напряжение стабилизации**

$U_{вх}$, В	5	6	7	8	9	10
$U_{ст}$ (при $R_н$ = 800 Ом), В						
$U_{ст}$ (при $R_н$ = 500 Ом), В						
$U_{ст}$ (при $R_н$ = 200 Ом), В						
$U_{ст}$ (при $R_н$ = 100 Ом), В						
$K_{ст.}$ (%)						

По результатам измерений построить графики зависимостей $U_{ст} = f(U_{вх.})$ от каждого $R_н$.

4. Снять временные характеристики $U_{вх}(t)$ и $U_{вых}(t)$ однополупериодного выпрямителя при подаче на диод напряжения синусоидальной, треугольной и прямоугольной формы.

Собрать схему по рисунку 13.5. Подсоединить генератор сигналов на вход схемы. Установить амплитуду на входе схемы 2 В частотой 200 Гц. Осциллограф подключить на выход схемы к R_3.

Последовательно подавать на вход выпрямителя синусоидальный, треугольный и прямоугольный сигналы. Зарисовать и сравнить осциллограммы входных и выходных напряжений.

Изменить частоту входного сигнала на f = 100 кГц и сравнить с $U_{вых}$

при f = 200 Гц. Обратить внимание на искажение формы высокочастотного сигнала при прохождении через низкочастотный диод.

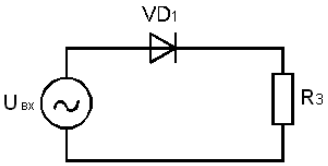


Рис. 13.5. Схема подключения выпрямителя

5. По начальному участку обратной ветви вольтамперной характеристики полупроводникового диода определить ток насыщения диода.

6. По обратной ветви вольтамперной характеристики стабилитрона определить напряжение начала лавинного пробоя (напряжение стабилизации).

13.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Изучить необходимые разделы в рекомендуемой литературе [1, 2, 5].

2. По справочнику записать паспортные данные и перерисовать характеристики исследуемых типов диодов.

13.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

По снятой ВАХ диода определить обратный ток насыщения – $I_{до}$ и из какого материала изготовлен диод.

Вычислить значение тока $I_{стаб}$

$$I_{стаб.} = (U_{вх} - U_{стаб})/R_6, \qquad (13.1)$$

где R_6 = 150 Ом.

Рассчитать дифференциальное сопротивление стабилитрона $R_{ст}$.

Определить динамическое сопротивление диода $R_д$ при U_1 = 0,5 В и U_2 = 0,65 В.

$$R_{дин} = (U_2 - U_1)/(I_2 - I_1). \qquad (13.2)$$

Значения U_1 и U_2, I_1 и I_2 выбираются из экспериментальной таблицы.

Вычислить коэффициент стабилизации $K_{ст}$ стабилитрона и температурный потенциал $\varphi_д$ выпрямительного диода

$$K_{ст} = \frac{U\left(R_н = 800\ \text{Ом}\right) - U\left(R_н = 100\ \text{Ом}\right)}{U\left(R_н = 800\ \text{Ом}\right)} \times 100\%; \qquad (13.3)$$

$$\varphi_д = \frac{U_{д2} - U_{д1}}{\ln I_{д2} - \ln I_{д1}} = \frac{\Delta U_д}{\ln \dfrac{I_{д2}}{I_{д1}}}. \qquad (13.4)$$

13.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Что такое собственная и примесная проводимости?
2. Как зависит положение уровня Ферми от концентрации примесей в примесных полупроводниках?
3. Что такое емкость p-n перехода и как она зависит от приложенного напряжения?
4. Объяснить разницу вольтамперных характеристик p-n перехода и полупроводникового диода.
5. Чем отличаются вольтамперные характеристики кремниевого и германиевого диодов?
6. Как влияет температура окружающей среды на вольтамперные характеристики диодов?
7. При каких условиях возникает тепловой пробой?
8. Чем определяется максимально допустимое обратное напряжение диода?
9. От чего зависит напряжение лавинного пробоя?
10. Как объяснить выпрямительные свойства p-n перехода?
11. Какие требования предъявляются к невыпрямляющему (омическому) контакту?
12. Как зависит ширина p-n перехода от приложенного напряжения?
13. Нарисовать эквивалентную схему диода.
14. Какие участки вольтамперных характеристик стабилитрона и стабистора являются рабочими?
15. Как включаются в схему стабилитрон и стабистор?
16. Объясните характер температурной зависимости электрической проводимости для чистого и примесного полупроводников.

13.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Принципиальные схемы исследования характеристик приборов, выполненные с соблюдением требований ГОСТ.

2. Таблицы экспериментальных данных и результаты расчёта.

3. Осциллограммы и графики токов и напряжений.

4. Выводы:

а) о влиянии прямого и обратного включения приборов на их работу и вид вольтамперных характеристик;

б) об изменении формы выходного напряжения при подаче на вход синусоидальных, треугольных и прямоугольных сигналов на высокой частоте при прохождении через низкочастотный выпрямительный диод;

в) сопоставить экспериментальные данные с результатами теоретического анализа.

Лабораторная работа № 14.
ИЗУЧЕНИЕ БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРОВ

***Цели работы*:** 1. Изучение принципа действия, схем включения, статических характеристик и параметров транзистора.

2. Приобретение практических навыков работы с биполярными транзисторами и аппаратурой, используемой при исследовании характеристик и измерении их параметров.

3. Приобретение навыков работы со справочной литературой по транзисторам.

14.1. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являются биполярные транзисторы. К средствам исследования относятся центральный процессор *PU*–2000, печатная плата *EB*–111, цифровой универсальный прибор.

14.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Транзистором называется полупроводниковый прибор в двумя *p*-*n*-переходами, предназначенный для усиления и генерирования электрических колебаний и представляющий собой пластину кремния или

германия, состоящую из трех областей. Две крайние области всегда обладают одинаковым типом проводимости, а средняя – противоположной проводимостью. Транзисторы, у которых крайние обладают электронной проводимостью, называются транзисторами *n*-*p*-*n*-типа (рис. 14.1, *а*); транзисторы, у которых крайние области обладают дырочной, а средняя электронной проводимостями – транзисторами *p*-*n*-*p*-типа (рис. 14.1, *б*). Физические процессы, происходящие в транзисторах двух типов, аналогичны и различие между ними заключается в том, что полярности включения источников питания их противоположны, а также в том, что если в транзисторе *n*-*p*-*n*-типа электрический ток создается в основном электронами, то в транзисторе *p*-*n*-*p*-типа – дырками. Смежные области, отделенные друг от друга *p*-*n*-переходами, называются эмиттером Э, базой Б и коллектором К.

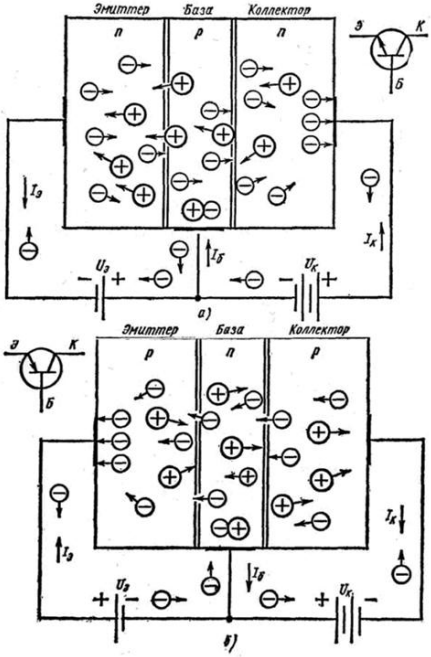


Рис. 14.1. Принцип работы и условное обозначение транзистора:
а – *n*-*p*-*n*-типа; *б* – *p*-*n*-*p*-типа

Эмиттер является областью, испускающей (эмигрирующей) носи-

тели зарядов электронов в транзисторе *n*-*p*-*n*-типа и дырок в транзисторе *p*-*n*-*p*-типа, коллектор – область, собирающая носители зарядов, база – средняя область, основание.

В условиях работы транзистора к левому *p*-*n*-переходу прикладывается напряжение эмиттер-база в прямом направлении, а к правому *p*-*n*-переходу – напряжение база-коллектор – в обратном. Под действием электрического поля большая часть носителей зарядов из левой области (эмиттера), преодолевая *p*-*n*-переход, переходит в очень узкую среднюю область (базу). Далее большая часть носителей зарядов продолжает двигаться ко второму переходу и, приближаясь к нему, попадает в электрическое поле, созданное внешним источником. Под влиянием этого поля носители зарядов втягиваются в правую область (коллектор), увеличивая ток в цепи батареи.

Если увеличить напряжение на эмиттере, то возрастет количество носителей зарядов, перешедших из эмиттера в базу, т. е. увеличится ток эмиттера на некоторую величину. При этом также увеличится ток коллектора на величину.

В базе незначительная часть носителей зарядов, перешедших из эмиттера, рекомбинирует со свободными носителями зарядов противоположной полярности, убыль которых пополняется новыми носителями зарядов из внешней цепи, образующими ток базы. Таким образом, ток коллектора окажется меньше тока эмиттера, незначительно отличаясь от последнего. Отношение приращения тока коллектора к приращению тока эмиттера при постоянном напряжении коллектора называется коэффициентом усиления по току и обычно имеет значение 0,9-0,995.

Если цепь эмиттер-база разомкнута и ток в ней равен нулю, а между коллектором и базой приложено напряжение, то в цепи коллектора будет проходить небольшой обратный (тепловой) ток, обусловленный неосновными носителями зарядов. Этот ток в сильной степени зависит от температуры и является одним из параметров транзистора (меньшее его значение соответствует лучшим качествам транзистора).

Так как левый (эмиттерный) *p*-*n*-переход находится под прямым напряжением, то он обладает малым сопротивлением. На правый же коллекторный) *p*-*n*-переход воздействует обратное напряжение и он имеет большое сопротивление. Поэтому напряжение, прикладываемое к эмиттеру, весьма мало (десятые доли вольта), а напряжение, подаваемое на коллектор, может быть достаточно большим (до нескольких десятков вольт). Изменение тока в цепи эмиттера, вызванное малым

напряжением, создает примерно такое же изменение тока в цепи коллектора, где действует значительно большее напряжение, в результате чего транзистор осуществляет усиление мощности.

14.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять семейство статических входных характеристик транзистора для схемы с ОЭ $I_б = f(U_{бэ})$ от каждого $U_{кэ}$.

Собрать схему исследования характеристик (рис. 14.2).

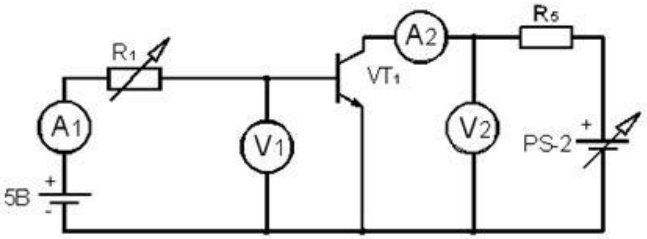


Рис. 14.2. Схема испытания транзистора

Входные характеристики снимаются для постоянных значений коллекторного напряжения $U_{к1} = 0$ и $U_{к2} = 5$ В. Выставить на PS–1 $U_{к1} = 0$. Изменяя $U_{бэ}$ с помощью R_1, которое измеряется вольтметром V_1, снять значения токов $I_б$ по амперметру A_1. Амперметр A_2 закоротить. Повторить измерения для $U_{к2} = 5$ В. Результаты измерений записать в таблицу 14.1 и построить обе характеристики на одном графике.

Таблица 14.1. **Входные характеристики транзистора для схемы с ОЭ $I_б = f(U_{бэ})$**

$U_{бэ}$, В										
$I_б$, мА	$U_{кэ} = 0$									
	$U_{кэ} = 5$ В									

2. Снять семейство статических выходных характеристик транзистора для схемы с ОЭ $I_к = f(U_{кэ})$ от каждого $I_б$.

Вольтметр V_1 отсоединить. Выходные характеристики снять для следующих фиксированных значений базового тока $I_б = 0$; 50 мкА; 75 мкА; 100 мкА, которые измеряются амперметром A_1. Результаты измерений записать в таблицу 14.2 и построить графики.

Таблица 14.2. **Входные характеристики транзистора для схемы с ОЭ $I_к = f(U_{кэ})$**

$U_{кэ}$, В											
$I_к$	при $I_б$ = 0										
	при $I_б$ = 50 мкА										
	при $I_б$ = 75 мкА										
	при $I_б$ = 100 мкА										

3. Снять семейство статических характеристик прямой передачи по току транзистора с ОЭ $I_к = f(I_б)$ от каждого $U_{кэ}$.

Для снятия характеристик прямой передачи тока транзистора в схеме отключить вольтметр V_1, на вольтметре V_2 с помощью *PS*–1 установить $U_{кэ}$ = 0 В. Изменяя с помощью R_1 ток базы $I_б$, измеренный амперметром A_1, снять показания амперметра A_2 – тока коллектора $I_к$. Повторить измерения для $U_{кэ}$ = 5 В. Результаты измерений записать в таблицу 14.3 и построить графики.

Таблица 14.3. Х**арактеристики транзистора по току для схемы с ОЭ $I_к = f(I_б)$**

$I_б$											
$I_к$	При $U_{кэ}$ = 0 В										
	При $U_{кэ}$ =5 В										

4. Определить на выходных характеристиках области: насыщения, отсечки и активного режимов работы транзистора.

14.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Предварительно по рекомендованной литературе [1, 2, 5] изучить теоретические сведения по биполярным транзисторам.

2. Изучить задание на лабораторную работу и методические указания к ней.

3. По справочнику записать паспортные данные, схему расположения выводов и перерисовать характеристики исследуемых транзисторов (тип транзистора указывается преподавателем).

14.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. По полученным характеристикам для заданной рабочей точки (задается преподавателем) определить *h*-параметры.

2. Вычислить физические параметры Т-образной эквивалентной схемы по *h*-параметрам.

3. По семействам выходных характеристик определить усиление по току β.

14.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Расскажите о прямом и обратном включении *p*-*n* перехода.

2. Нарисуйте структурную схему и условное обозначение транзисторов типа *p*-*n*-*p* и *n*-*p*-*n*.

3. Объясните принцип действия биполярного транзистора. Какие физические процессы происходят в транзисторе?

4. Схемы включения транзисторов: ОЭ, ОБ, ОК. Их сравнительная характеристика по коэффициентам усиления тока, напряжения, $R_{вх.}$, $R_{вых.}$

5. Статические характеристики транзисторов по схеме: ОБ, ОЭ (входная, выходная, прямой передачи по току, обратной связи по напряжению).

6. Системы *z*, *y*, *h*-параметров. Недостатки системы *z*, *y*-параметров. Методы определения *h*-параметров.

7. Т-образные физические эквивалентные схемы транзистора. Связь параметров Т-образных эквивалентных схем (физических параметров) с *h*-параметрами.

8. Укажите напряжения, приложенные к *p*-*n* переходам на пологом ($U_{кэ} > U_{кэн}$) и крутом участках выходной характеристики.

9. Перечислите основные достоинства и недостатки схемы с ОБ.

10. Перечислите основные достоинства и недостатки схемы с ОЭ.

11. Расскажите о модуляции толщины базы.

12. Почему схема с общим эмиттером получила наибольшее распространение?

14.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Принципиальные схемы исследования характеристик транзисторов, выполненные с соблюдением требований ГОСТ.

2. Таблицы экспериментальных данных и результаты расчёта.

3. Графики характеристик транзисторов.

4. В конце отчёта сделать выводы по проделанной работе. Сопоста-

вить экспериментальные данные с результатами теоретического анализа по физическим параметрам и статическим характеристикам.

Лабораторная работа № 15.
ИЗУЧЕНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ ТИРИСТОРОВ

Цель работы: снятие вольтамперных характеристик тиристора; определение параметров тиристора.

15.1. ОБЪЕКТ И СРЕДСТВА ИССЛЕДОВАНИЯ

Объектом исследований являются тиристоры. К средствам исследования относятся центральный процессор *PU*–2000, печатная плата *EB*–112, цифровой универсальный прибор.

15.2. ОБЩИЕ СВЕДЕНИЯ О ТИРИСТОРАХ

Четырехслойный кремниевый вентиль с двумя электродами (анодом и катодом) называется динистором. Если кроме анода и катода имеется третий (управляющий) электрод, то вентиль становится управляемым и называется тиристором.

Тиристор, как динистор, имеет четыре слоя – *p*-*n*-*p*-*n* (рис. 15.1), между которыми находятся три *p*-*n*-перехода П1, П2, П3. У тиристора от средней области *p* имеется вывод – управляющий электрод У.

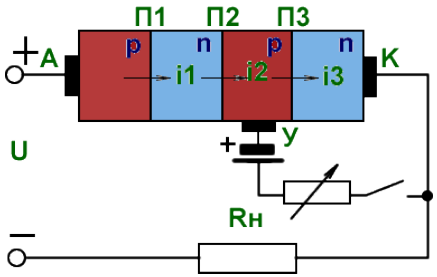


Рис. 15.1. Схема устройства тиристора

При отключенном управляющем электроде тиристор превращается в динистор.

Если между анодом и катодом вентиля приложено небольшое по-

стоянное напряжение в прямом направлении, то переходы П1 и П3 будут открытыми и их сопротивление мало. Переход П2 будет включен в обратном (непроводящем) направлении и его сопротивление велико, так что все приложенное к тиристору напряжение будет практически на переходе П2, а ток в цепи мал.

При повышении напряжения *U* на тиристоре ток в цепи увеличивается незначительно, так как ограничивается большим сопротивлением перехода П2 и вольтамперная характеристика тиристора будет подобна обратной ветви характеристики диода (кривая *Оа* на рис. 15.2).

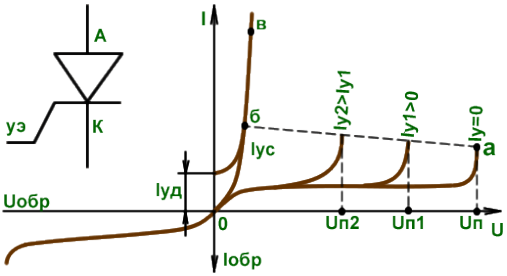


Рис. 15.2. ВАХ тиристора и его условное обозначение

Если напряжение достигнет некоторого определенного значения, называемого напряжением переключения $U_{пер}$, то в переходе П2 напряженность электрического поля становится достаточной для ионизации и образования новых свободных носителей зарядов (электронов и дырок), его сопротивление резко уменьшается и тиристор открывается.

Напряжение на открытом тиристоре (участок *бв* на рис. 15.2) мало (порядка 1-2 В) и почти неизменно, так что ток в цепи ограничивается сопротивлением внешней нагрузки.

Наибольший ток тиристора лимитируется предельно допустимой мощностью, рассеиваемой им. Если уменьшать ток через открытый тиристор, то он будет оставаться открытым до тех пор, пока ток в тиристоре достаточен для поддержания процесса образования носителей зарядов в переходе П2.

При токе, меньше определенного значения, называемого током удержания $I_{уд}$, тиристор закрывается, т. е. возвращается в непроводящее состояние.

Если на управляющий электрод подать положительный потенциал

от постороннего источника, то в переходе П3 возникнет ток управления и появятся дополнительные носители зарядов, вследствие чего уменьшится напряжение переключения этого перехода и тиристор открывается при меньшем напряжении $U_{п1}$.

Чем больше ток управления $I_у$, тем больше дополнительных зарядов в переходе П3 и меньше напряжение переключения тиристора. При определенном значении тока управления, называемом током спрямления $I_{ус}$ тиристор будет работать как неуправляемый вентиль, т. е. будет открыт при любом положительном напряжении на его аноде. Таким образом, тиристор открывается как при подаче на его анод напряжения переключения, так и при включении тока управления достаточной величины $I_{ус}$.

Так как управляющий электрод после открытия тиристора перестает оказывать влияние на его работу, то в цепи управляющего электрода проходит кратковременный импульс тока прямоугольной формы и длительностью примерно 10 мкс.

При подаче на зажимы тиристора обратного напряжения $U_{обр}$ он будет закрыт обратно включенными переходами П1 и П3 независимо от управляющего тока и его вольт-амперная характеристика практически не отличается от обратной ветви вольтамперной характеристики неуправляемого вентиля (рис. 15.2).

Тиристоры имеют два устойчивых состояния: при закрытом тиристоре его сопротивление очень велико ($R \sim \infty$), при открытом – мало ($R \sim 0$). Поэтому тиристоры находят применение как бесконтактные переключатели в инверторах, регулируемых выпрямителях, в схемах защиты и т. д.

Конструкция мощного тиристора показана на рис. 15.3.

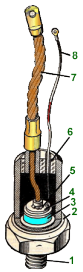


Рис. 15.3. Тиристор:
1 – вывод катода, *2* – корпус, *3* – кристаллодержатель, *4* – кристаллическая структура, *5* – припой, *6* – изолятор, *7* – вывод анода, *8* – вывод управляющего электрода

Четырехслойная кристаллическая структура *4*, укрепленная на кристаллодержателе *3*, помещена в металлическом корпусе *2*, в нижней части которого находится резьбовой вывод катода *1*. К верхнему *p*-слою припоем *5* крепится плетеный вывод анода *7*. В среднюю *p*-область вводится вывод управляющего электрода *8*. Выводы анода и управляющего электрода укрепляют в корпусе изолятором *6*.

15.3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

1. Снять и построить ВАХ тиристора $I_а = f(U_{ак})$ при значениях управляющего тока от 1 до 10 мА.

Измерить сопротивления переменных резисторов *RV*2 и *P*1, а также резисторов *R*8, *R*9 и *R*10.

Собрать схему для снятия вольтамперной характеристики тиристора $I_а = f(U_{ак})$ с нагрузкой в цепи анода (*R*8 + *R*9 + *P*1), показанную на рис. 15.4.

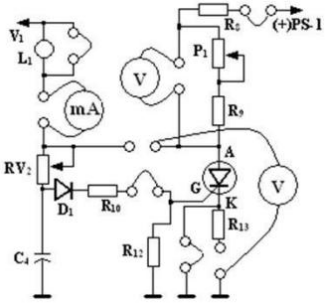


Рис. 15.4. Схема для снятия ВАХ тиристора

Установить напряжение источника питания *PS*-1, равным 10 В. Установить максимальное значение переменного резистора *RV*2. Установить максимальное значение переменного резистора-потенциометра *P*1.

Постепенно повышать ток управляющего электрода путем уменьшения сопротивление переменного резистора *RV*2. В момент включения тиристора вольтметр начнет показывать падение сопротивления на нагрузке. Нужно зарегистрировать показания миллиамперметра в этот момент времени, т.е. включающий ток управляющего электрода $I_{уэ}$.

Измерить напряжение между анодом и катодом тиристора $U_{ак}$, показания приборов занести в таблицу 15.1.

Таблица 15.1. **Данные для построения ВАХ тиристора**

Сопротивление нагрузки, Ом	$R_{н1}$	$R_{н2}$	$R_{н3}$
Включающий ток, мА			
Напряжение $U_{ак}$			

После включения тиристора разомкните цепь управляющего электрода и убедитесь в том, что при этом тиристор остается в включенном состоянии. Для отключения тиристора нужно разомкнуть анодную цепь либо уменьшить напряжение источника *PS*-1. Изменяя в сторону уменьшения сопротивление нагрузки, получить несколько значений включающего тока управляющего электрода $I_{уэ}$ и напряжения $U_{ак}$ при различных значениях нагрузки.

2. Измерить величину анодного тока удержания.

Для этого необходимо собрать схему, показанную на рис. 15.5.

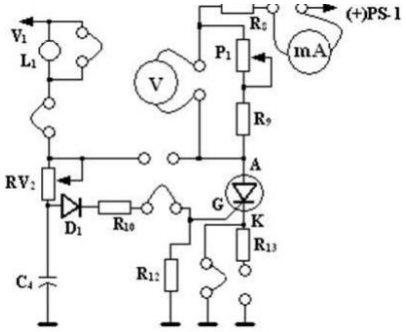


Рис. 15.5. Схема для измерения тока удержания тиристора

Постепенно уменьшая напряжение источника питания *PS*-1 с помощью регулятора, нужно зарегистрировать показание миллиамперметра перед моментом отключения тиристора. Оно будет равно току удержания тиристора $I_{уд}$.

15.4. ПОДГОТОВКА К ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ

1. Предварительно по рекомендованной литературе [1, 2, 5] изучить теоретические сведения о тиристорах.

2. Изучить задание на лабораторную работу и методические указания к ней.

3. По справочнику записать паспортные данные, схему расположения выводов и перерисовать характеристики исследуемого тиристора.

15.5. УКАЗАНИЯ ПО ВЫПОЛНЕНИЮ РАБОЧЕГО ЗАДАНИЯ И ОБРАБОТКЕ РЕЗУЛЬТАТОВ ЭКСПЕРИМЕНТА

1. Построить ВАХ тиристора: провести 3 нагрузочные линии, соединяя точку 10 В на оси напряжения с точками $E_п$ / $R_{н1}$; $E_п$ / $R_{н2}$; $E_п$ / $R_{н3}$ на оси тока.

2. На нагрузочных линиях нанести точки 1, 2, 3, на расстояниях от оси тока соответственно $U_{ак1}$, $U_{ак2}$, $U_{ак3}$.

3. Нанести точку с координатами $U_{ак1}$; $I_{уд}$.

4. Соединить полученные точки и получить восходящую часть характеристики, нижнюю часть характеристики снять не представляется возможным и ее нужно прочертить так, как показано на рис. 15.6.

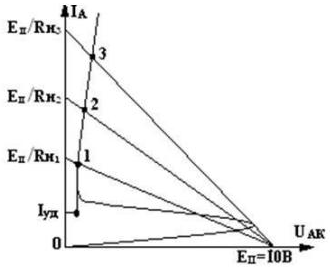


Рис. 15.6. Построение ВАХ тиристора

15.6. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Принцип действия тиристора, физические процессы в четырехслойной структуре с тремя *p-n* переходами.

2. Изобразите вольтамперные характеристики тиристора при различных значениях управляющего тока.

3. Почему тиристор не отключается при отключении тока управляющего электрода?

4. Каким образом можно прервать анодный ток тиристора?

5. От чего зависит величина анодного тока тиристора?

6. Можно ли регулировать величину анодного тока изменением управляющего тока?

7. Каким образом может включаться тиристор в цепь нагрузки?
8. В каких устройствах используются тиристоры?

15.7. ПОРЯДОК ОФОРМЛЕНИЯ ОТЧЁТА

Отчёт должен содержать:

1. Принципиальные схемы исследования характеристик тиристора, выполненные с соблюдением требований ГОСТ.
2. Таблицы экспериментальных данных и результаты расчёта.
3. Графики характеристик тиристора.
4. В конце отчёта сделать выводы по проделанной работе.