

## Оглавление

Введение.....	4
Лабораторная работа 1 Ознакомление с оборудованием и электроизмерительными приборами лабораторного стенда. Сборка схем.....	6
Лабораторная работа 2 Исследование режимов работы аккумуляторов .....	16
Лабораторная работа 3 Определение параметров катушки индуктивности.....	27
Лабораторная работа 4 Исследование неразветвленной электрической цепи.....	35
Лабораторная работа 5 Компенсация реактивной мощности .....	42
Лабораторная работа 6 Исследование цепи трехфазного тока при соединении потребителей по схеме «звезда» .....	49
Лабораторная работа 7 Исследование цепи трехфазного тока при соединении потребителей по схеме «треугольник».....	59
Лабораторная работа 8 Исследование однофазного индукционного счетчика электрической энергии.....	66
Лабораторная работа 9 Исследование работы однофазного трансформатора .....	74
Лабораторная работа 10 Пуск трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором.....	83

## Введение

*Электротехника* — это наука о техническом (т.е. практическом, прикладном) использовании электрических и магнитных явлений. Электротехника выделилась в самостоятельную науку из физики в конце XIX века. Основы для развития электротехники заложили обширные экспериментальные исследования и создание теорий электричества и магнетизма. Широкое практическое применение электричества стало возможно только в XIX веке с появлением вольтова столба, что позволило как найти приложение открытым законам, так и углубить исследования. В этот период вся электротехника базировалась на постоянном токе. В конце XIX века, с преодолением проблемы передачи электроэнергии на большие расстояния за счёт использования переменного тока и созданием трехфазного электродвигателя, электричество повсеместно внедряется в промышленность, а электротехника приобретает современный вид, включающий множество разделов, и оказывает влияние на смежные отрасли науки и техники.

Можно выделить три основных направления, в которых используются эти явления: преобразование энергии (энергетическое), превращение вещества (технологическое), получение и передача информации (информационное). Электрическая энергия универсальна, так как сравнительно легко преобразуется в другие виды энергии; кроме того, ее можно производить на мощных электростанциях, передавать на огромные расстояния при сравнительно небольших потерях и легко распределять между различными потребителями. Рост потребности в постоянном токе (электрохимия, электрический транспорт) обусловил развитие преобразовательной техники. Вначале для преобразования переменного тока в постоянный применялись электромашинные устройства, а затем стали использоваться ионные приборы, что привело к зарождению такой отрасли техники, как промышленная электроника.

Основная цель преподавания дисциплины заключается в формировании знаний и практических навыков по теории электрических цепей, магнитных цепей, устройству электрических машин, электроизмерительных приборов и электроснабжения.

Исходя из вышесказанного, при изучении дисциплины студенты должны знать основы:

- теории электрических и магнитных цепей;
- теории и конструкции электрических машин и электропривода;
- теории измерений при помощи современных измерительных приборов и устройств;
- электроснабжения.

В лабораторном практикуме приведены методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электроснабжение с основами электротехники», краткие теоретические сведения по темам лабораторных работ, необходимые формулы и иллюстрации, порядок выполнения лабораторных работ, перечень контрольных вопросов для самопроверки.

Лабораторный практикум предназначен для студентов направления подготовки 08.03.01 «Строительство» (профиль «Промышленное и гражданское строительство»). Квалификация выпускника — бакалавр.

#### *Общие требования по технике безопасности*

1. Ознакомиться с положениями лабораторного практикума по данной дисциплине.
2. Получить инструктаж по технике безопасности на рабочем месте и расписаться в журнале по технике безопасности.
3. Перед началом работы необходимо убедиться в исправности лабораторного оборудования, на котором предстоит работать. О замеченных неисправностях сообщить преподавателю.
4. Перед началом сборки схемы необходимо убедиться в том, что стенд выключен (рычажок автоматического выключателя стенда находится в нижнем положении).
5. После сборки схемы необходимо представить ее на проверку преподавателю. Включать схему без проверки запрещается!
6. При появлении во время работы искр, треска, дыма или других признаков сбоев в работе оборудования немедленно выключить главный автоматический выключатель стенда и сообщить об этом преподавателю.
7. Запрещается самостоятельно устранять неисправности электрооборудования.
8. При возникновении несчастного случая в лаборатории следует сообщить преподавателю или лаборанту для выяснения и устранения его причин и оказания первой помощи пострадавшему.
9. Разбирать схему разрешается только после проверки преподавателем результатов лабораторных исследований.
10. После окончания работы необходимо выключить автоматические выключатели стендов и главный автоматический выключатель лаборатории. Установить приборы и оборудование на исходные места.

## Лабораторная работа 1

### Ознакомление с оборудованием и электроизмерительными приборами лабораторного стенда. Сборка схем

*Цель работы:* получение практических навыков по чтению и составлению электрических схем, сборке электрических цепей на лабораторном стенде, умению пользоваться электроизмерительными приборами.

#### *Основные теоретические сведения*

*Электрическая цепь* представляет собой совокупность отдельных элементов, соединенных между собой определенным образом, и предназначенная для протекания электрического тока. Соединение элементов между собой может производиться *безразборными* (пайка, сварка, опрессовка) и *разборными* (болтовое, штепсельное, клеммное и т.д.) методами, в зависимости от поставленной задачи и требований технологии. В электрической цепи происходит преобразование электрической энергии: механическая и химическая преобразуются в электрическую, а электрическая — в тепловую, световую, механическую и т.д. В состав цепи могут входить источники электрической энергии, потребители, соединительные провода, аппараты управления, защиты и сигнализации, электроизмерительные приборы, преобразующие устройства и т.д.

Электрические цепи могут быть *неразветвленными* (во всех ее элементах течет один и тот же ток) и *разветвленными* (в каждой ветви течет свой ток). *Узлом* называют такую точку электрической цепи, где соединяется более двух проводников. *Ветвью* называют участок цепи, заключенный между двумя узлами, на протяжении которого сила тока имеет одно и то же значение. Все элементы электрической цепи имеют графические и условные буквенные обозначения на схемах, выполняемые в соответствии с требованиями ГОСТ.

Электрические цепи могут быть *линейными* и *нелинейными*. Линейной электрической цепью называют такую цепь, все компоненты которой линейны. К линейным компонентам относятся зависимые и независимые идеализированные источники токов и напряжений, резисторы (подчиняющиеся закону Ома) и любые другие компоненты, описываемые линейными дифференциальными уравнениями. Наиболее известны электрические конденсаторы и индуктивности. Если цепь содержит отличные от перечисленных компоненты, то она называется нелинейной.

Электрические цепи обязательно содержат *источники электрической энергии*. Часто на схемах сами источники не изображаются, но обозначаются клеммы электрической сети, от которой питается цепь. Электрическая сеть с трехфазным напряжением 380/220 В не всегда пригодна для нормальной работы исследуемой цепи. Поэтому могут применяться дополнительно *трансформаторы* и различные *регуляторы напряжения*. Для плавного регулирования переменного однофазного напряжения часто используют *лабораторный автотрансформатор* ЛАТР. Перемещая движок по его обмотке, можно плавно изменять выходное напряжение от 0 до 250 В (рис. 1.1).

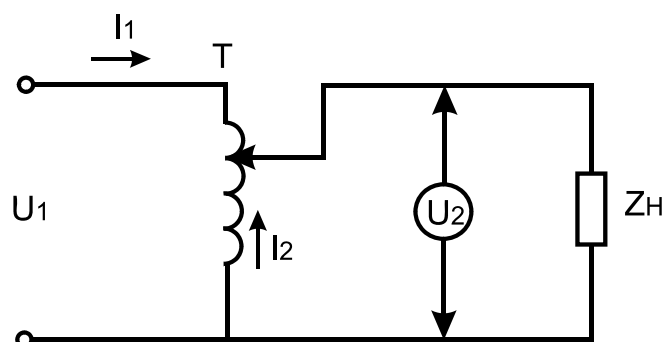


Рис. 1.1. Схема подключения лабораторного автотрансформатора

Если в лаборатории требуется постоянное напряжение, то можно использовать *аккумуляторы* и *выпрямители*. Постоянное регулируемое напряжение можно получить, если применить ЛАТР и выпрямитель, включенные последовательно.

Часто для лабораторных работ используют пониженное трехфазное и однофазное напряжения, а также источники энергии с регулируемой частотой напряжения. На табличках оборудования указываются их *номинальные данные*.

В качестве потребителей электрической энергии можно использовать *реостаты*, *лампы накаливания*. На табличке (бирке) реостатов и ламп накаливания указаны их номинальные данные: *напряжение, ток, мощность, сопротивление*. Следует иметь в виду, что действительные значения параметров могут отличаться от номинальных в пределах  $\pm 10 \dots 20\%$ .

В цепях переменного напряжения в качестве нагрузки используются также *конденсаторы*, *катушки индуктивности* с плавным или ступенчатым регулированием параметров: изменением площади пластин конденсатора, расстояния между обкладками и т.д.; изменением числа витков катушки, зазора между магнитопроводом, изменением взаимного расположения катушки и магнитопровода. В качестве нагрузки можно также использовать электродвигатели, преобразователи и т.д.

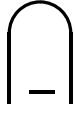

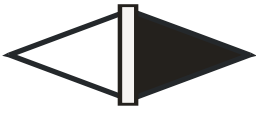
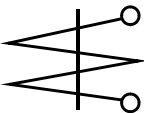
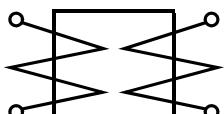
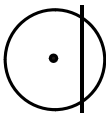
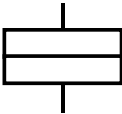
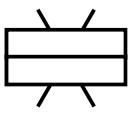
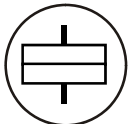
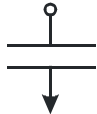

Для защиты от перегрузок и коротких замыканий применяют *автоматические выключатели, предохранители и специальные электронные устройства*. Они разрывают цепь нагрузки при отклонении условий работы от номинальных. В схемах лабораторных работ защитные устройства обычно не указываются. Питание цепей постоянного тока для полупроводниковых устройств производится от блоков с электронной защитой, срабатывающей за тысячные доли секунды и возвращающейся в исходное состояние после устранения ненормального режима.

Для контроля электрических параметров цепей применяют *амперметры, вольтметры, ваттметры, омметры, осциллографы, комбинированные приборы* и т.д. Приборы бывают щитовые и переносные, предназначенные для измерений на постоянном или переменном токе. Они могут быть одно- и многопредельными, могут иметь различные конструктивные особенности.

Согласно ГОСТ 23217—78, для электроизмерительных аналоговых приборов с непосредственным отсчетом установлены нижеследующие *условные обозначения*, наносимые на них.

- *Основные единицы измерения и их кратные и дольные значения*: например, ампер — А, килоампер — кА, миллиампер — mA, микроампер —  $\mu$ A.
- *Род тока*: постоянный, обозначается знаком «—», переменный — «~», постоянный и переменный — « $\sim$ », трехфазный — « $\approx$ ».
- *Безопасность*. Внутри пятиконечной звездочки указана цифра *испытательного напряжения* в киловольтах (испытывается измерительная часть прибора относительно корпуса). Если стоит цифра 0, то это означает, что прибор испытанию прочности изоляции не подлежит. Если внутри звездочки не указана цифра, то это означает, что испытательное напряжение равно 500 В.
- *Используемое положение шкалы*. Прибор применять при вертикальном положении шкалы —  $\perp$ ; прибор применять при горизонтальном положении шкалы —  $\square$ ; прибор применять при наклонном положении шкалы (под углом, например  $60^\circ$ ) —  $\sphericalangle 60^\circ$ .
- *Класс точности*. Класс точности представляет собой наибольшее значение приведенной относительной погрешности прибора и указывается на приборе цифрой без размерности, например: 0,5; 1,0; 1,5 и т.д.
- *Общие условные обозначения по физическому принципу действия измерительного механизма приборов* (системы приборов) наносятся на шкалы приборов в виде значков определенной формы. Некоторые из них приведены в таблице 1.1.

*Таблица 1.1. Общие условные обозначения  
принципа действия электроизмерительных приборов*

Наименование прибора	Обозначение
Прибор магнитоэлектрический с подвижной рамкой	
Логометр магнитоэлектрический	
Прибор магнитоэлектрический с подвижным магнитом	
Прибор электромагнитный	
Логометр электромагнитный	
Прибор индукционный	
Прибор электродинамический	
Логометр электродинамический	
Прибор ферродинамический	
Прибор электростатический	
Прибор магнитоэлектрический с выпрямителем	

Для измерения электрических величин в широких пределах используют *многопредельные электроизмерительные приборы*. Для перевода с одного предела измерений на другой такие приборы снабжены переключателями (поворотными или кнопочными) или дополнительными клеммами. Пределы измерений следует устанавливать в зависимости от ожидаемого значения электрической величины таким образом, чтобы прибор не оказался перегруженным. В то же время нельзя завышать предел измерения, так как в этом случае стрелка прибора будет отклоняться на малый угол, и точность измерения снизится.

Например, вольтметр имеет пределы измерения: 75, 150, 300, 450 В, а напряжение источника — 220 В. Следовательно, на приборе необходимо установить предел измерения 300 В.

Практика показывает, что при всяком измерении непрерывной величины неизбежна некоторая погрешность  $\Delta$  — разница между измеренным  $A_{из}$ , и действительным  $A$  значениями измеряемой величины:

$$\Delta = A_{из} - A.$$

Эта разница носит название *абсолютной погрешности* измерения. Для более полной характеристики измерений вводят понятие *относительной погрешности* измерения  $\delta$ :

$$\delta = \frac{\Delta}{A} 100\%.$$

#### Определение цены деления многопредельного прибора

*Цена деления* многопредельного прибора определяется как частное от деления предела, указанного на переключателе, на число делений, обозначенное цифрой на конце шкалы.

Например, у *амперметра*, имеющего на шкале 100 делений, на пределе 2 А цена деления составит 0,02 А, а у *вольтметра*, имеющего 150 делений, цена деления на пределе 75 В составит 0,5 В.

Цена деления многопредельного *ваттметра* равна произведению пределов измерения напряжения и силы тока, деленному на число делений шкалы прибора.

Например, ваттметр, имеющий шкалу на 150 делений, с пределами по току 5 А и по напряжению 300 В, будет иметь цену деления, равную 10 Вт.



## Устройство лабораторного стенда общей электротехники

Лабораторный стенд общей электротехники ЛСОЭ-3 представляет собой комплекс приборов и оборудования для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электроснабжение с основами электротехники». Устройство его показано на рисунке 1.2.

На верхней панели стенда установлены электроизмерительные приборы 1 (амперметры и вольтметры) класса точности 1,5 (обычно четыре амперметра и один вольтметр, но возможны и другие варианты).

В левой части стенда размещается блок нагрузки (лампы накаливания 2, включаемые при помощи тумблеров 3).

В центральной части стенда размещаются резисторы, имитирующие линию электропередач 4, однофазный трансформатор 5 и блок RLC (резистор 6, катушка индуктивности 7, конденсатор переменной емкости 8 с тумблерами значений емкостей 9).

Правая часть стенда представлена блоком питания, включающим в себя автоматический выключатель 10, расположенный на правой торцевой стенке стенда; лабораторный автотрансформатор (ЛАТР) 11 и его клеммы « $\sim 0 \dots 250 \text{ В}$ » 12; блок трехфазного напряжения (клеммы «ABCN») 13; клеммы « $\sim 220 \text{ В}$ » 14 и диодный мост 15 для преобразования переменного тока в постоянный.

Подача трехфазного напряжения на стенд осуществляется включением в верхнее положение автоматического выключателя. При этом подается напряжение на клеммы « $\sim 220 \text{ В}$ », служащие для подключения как лабораторного оборудования, так и вспомогательной аппаратуры (например, паяльников).

Подача напряжения сопровождается загоранием сигнальной лампы 16 (тиратрон МТХ-90). Включение того или иного блока осуществляется посредством магнитных пускателей, расположенных внутри стенда, которые срабатывают при нажатии кнопок «Пуск» 17 (черного цвета). При включении также загораются сигнальные лампы. Отключение того или иного блока осуществляется кнопками «Стоп» 18 (красного цвета). Диодный мост имеет четыре вывода: два (обозначаемые « $\sim$ ») подключаются к сети переменного тока, а остальные два (обозначаемые «+», «-») к нагрузке.

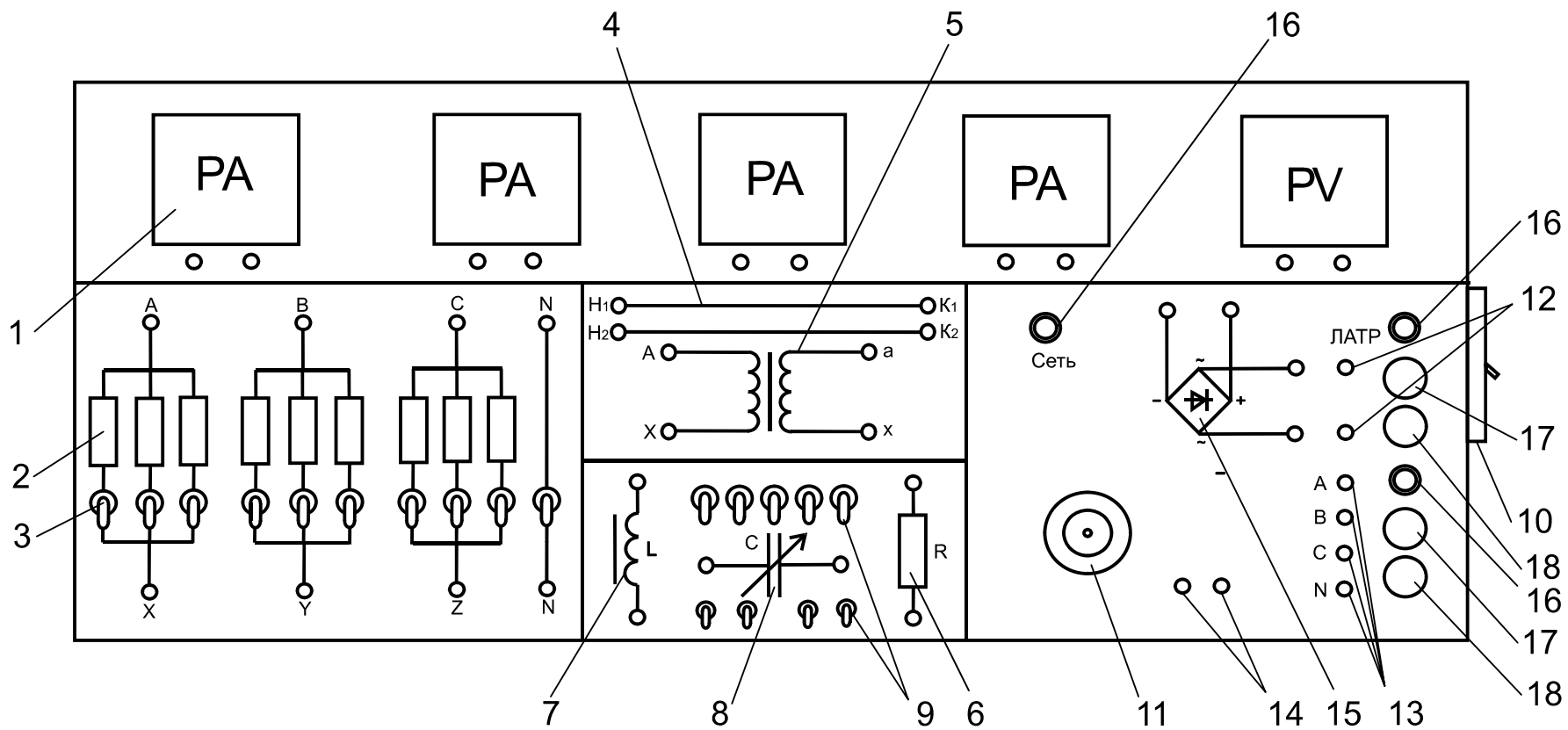


Рис. 1.2. Устройство лабораторного стенда ЛСОЭ-3

### Порядок выполнения работы

1. Ознакомиться со всеми приборами лабораторного стенда. Записать технические характеристики нескольких приборов (по указанию преподавателя) и определить их цену деления.

2. Ознакомиться с аппаратурой стенда.

3. Измерить напряжения всех источников питания при помощи вольтметра.

4. Составить схему с последовательным соединением нескольких резисторов. В схеме предусмотреть приборы для измерения силы тока, напряжения и мощности. После проверки правильности составленной схемы преподавателем собрать ее на лабораторном стенде и произвести необходимые измерения электрических величин. Пример схемы показан на рисунке 1.3.

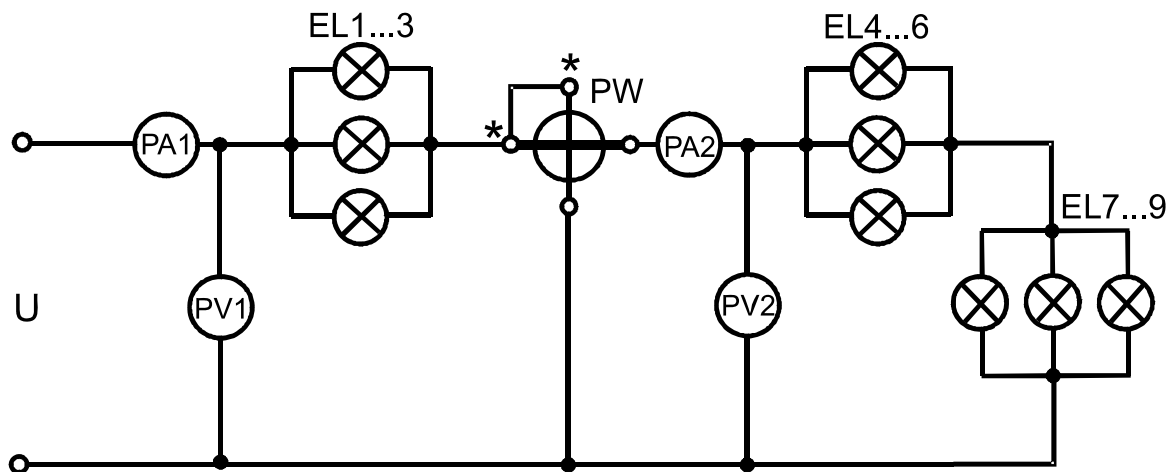


Рис. 1.3. Схема с последовательным соединением нескольких нагрузок

Результаты измерений электрических величин занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2. Результаты измерений электрических величин

Соединение нагрузок	PA1	PA2	PV1	PV2	PW
	А	А	В	В	Вт
Последовательное					
Параллельное					
Смешанное					

5. Повторить пункт 4 с параллельным соединением резисторов.

6. Повторить пункт 4 со смешанным соединением резисторов.

Чтобы быстро и правильно собрать на стенде электрическую цепь, необходимо собрать сначала все последовательные цепи, а уже затем присоединить все параллельные цепи. Если длины провода не хватает, можно нарастить его, состыковав два провода на клемме оборудования стенда, не задействованного в данной схеме (следует использовать только одну клемму устройства). Нарастивать провода на клеммах источника питания запрещается!

7. После окончания работы отключить питание стенда, разобрать схему.

### *Содержание отчета*

1. Наименование и цель работы.
2. Технические данные приборов и оборудования, используемых в работе.
3. Принципиальные электрические схемы исследований.
4. Результаты измерений электрических величин.
5. Выводы по работе.

### *Контрольные вопросы*

1. Из каких элементов состоит электрическая цепь и каково их назначение?
2. Что называют узлом и ветвью электрической цепи?
3. Каков порядок сборки электрической цепи?
4. Как условно изображают системы электроизмерительных приборов?
5. Какие условные обозначения наносят на шкалы приборов? Расшифруйте условные обозначения на шкале прибора по заданию преподавателя.
6. Начертите схему включения амперметра, вольтметра, ваттметра.
7. Как поступить, если стрелка прибора отклонилась влево (вправо) от нулевой отметки при отключенном приборе?
8. Как поступить, если стрелка прибора отклонилась за максимальное деление шкалы?
9. Как поступить, если стрелка ваттметра отклонилась влево от нулевой отметки при включенном приборе?
10. Как определить цену деления комбинированного (многопредельного) прибора?
11. Как измерить ЭДС аккумулятора?

12. Два одинаковых сопротивления соединены последовательно (параллельно). Чему равно результирующее сопротивление?
13. Что будет, если в исследуемой цепи поменять местами амперметр и вольтметр?
14. Назначение, устройство и принцип работы лабораторного автотрансформатора (ЛАТР).
15. Какие устройства используются в электрических цепях для защиты от перегрузок и коротких замыканий?
16. Какие приборы используются для измерения электрических величин?
17. Указать основные методы электрических измерений.
18. Каков принцип работы приборов электромагнитной системы?
19. Каков принцип работы приборов электродинамической системы?
20. Что такое абсолютная и относительная погрешности измерений?
21. Какие цепи называются линейными и нелинейными?

#### *Список рекомендованных источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 4-12.
2. Касаткин, А.С. Электротехника и электроника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 5-11.
3. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 11-16, 118-127.
4. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — С. 14-22, 403-423.

## Лабораторная работа 2

### Исследование режимов работы аккумуляторов

*Цель работы:* изучение режимов работы аккумулятора как источника постоянного тока.

#### *Основные теоретические сведения*

*Аккумулятором* называется химический источник, который может сохранять электрическую энергию, накопленную при протекании через него электрического тока из постороннего источника.

Первый прообраз аккумулятора, который можно было многократно заряжать, был создан в 1803 году Иоганном Вильгельмом Риттер. Его аккумуляторная батарея представляла собой столб из пятидесяти медных кружочков, между которыми было проложено влажное сукно. Пропустив по нему ток от вольтова столба, данное устройство само стало вести себя как источник электричества.

Принцип действия аккумулятора основан на обратимости химической реакции. Работоспособность аккумулятора может быть восстановлена путём заряда, то есть пропусканием электрического тока в направлении, обратном направлению тока при разряде.

Основными параметрами аккумулятора являются электродвижущая сила (ЭДС)  $E$  и его внутреннее сопротивление  $R_B$ . ЭДС характеризует способность источника энергии создать ток в электрической цепи, она численно равна напряжению между его зажимами при отсутствии тока (холостой ход, нагрузка отключена) и внутри источника направлена от отрицательного зажима к положительному.

Процесс заряда-разряда аккумулятора можно пояснить химической формулой



где  $\text{PbO}_2$  — положительный электрод;

$\text{Pb}$  — отрицательный электрод;

$\text{H}_2\text{SO}_4$  — водный раствор серной кислоты;

$\leftrightarrow$  — заряд-разряд.

Если к аккумулятору подключить нагрузку с сопротивлением  $R$ , то в цепи возникает ток, величина которого определяется по закону Ома для электрической цепи с ЭДС,  $A$ :

$$I = \frac{E}{R + R_B}.$$

Преобразуем это выражение и получим формулу зависимости напряжения на зажимах приемника от тока нагрузки:

$$I(R + R_B) = E.$$

Так как  $IR = U$ , то  $U = E - IR_B$ .

Величина внутреннего сопротивления аккумулятора  $R_B$  практически постоянна и составляет сотые доли Ом, поэтому падение напряжения на внутреннем сопротивлении аккумулятора  $IR_B$  растет пропорционально току нагрузки. Таким образом, величина напряжения на зажимах аккумулятора (приемника) будет уменьшаться с увеличением тока нагрузки. При этом внутри аккумулятора теряется часть мощности:

$$\Delta P = I^2 R_B.$$

Величина выделившейся тепловой энергии определяется по закону Джоуля-Ленца, Вт·ч:

$$W = I^2 R_B t,$$

где  $t$  — время прохождения тока, ч.

Следовательно, внутреннее сопротивление — параметр, характеризующий тепловые потери в источнике и влияющий на его энергетические характеристики. Внутреннее сопротивление аккумулятора может быть определено на основании закона Ома по данным режимов холостого хода и какого-либо рабочего режима:

$$R_B = \frac{E - U}{I}$$

или по эмпирической формуле для стопроцентно заряженного кислотного аккумулятора при температуре 20 °С:

$$R_B = \frac{U_H}{17,1Q},$$

где  $U_H$  — напряжение на зажимах аккумулятора при номинальном разрядном токе, В;

$Q$  — емкость аккумулятора, А·ч.

Величина внутреннего сопротивления аккумулятора может быть определена по его *внешней характеристике* — зависимости напряжения на зажимах аккумулятора от тока нагрузки. Напряжение на зажимах аккумулятора линейно зависит от силы тока и нагрузки и изображается в виде прямой линии, пересекающей оси тока и напряжения (рис. 2.1).

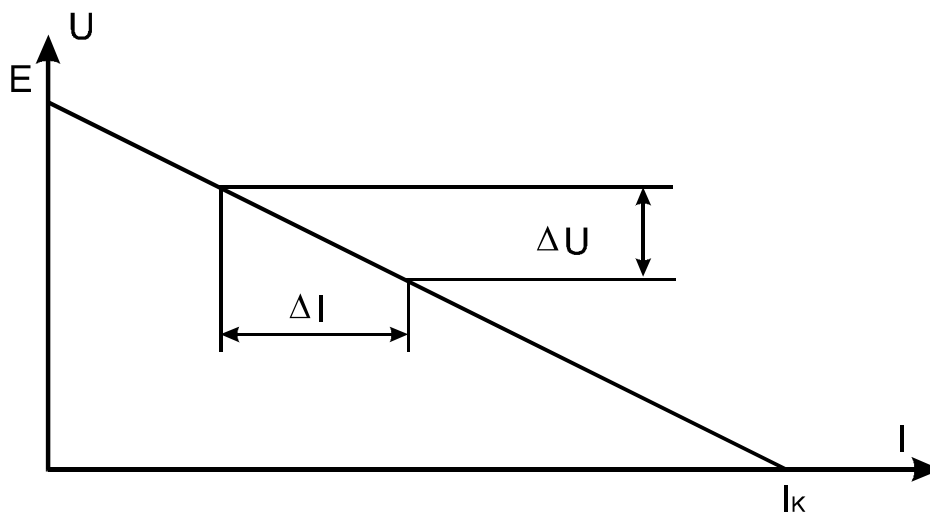


Рис. 2.1. Внешняя характеристика аккумулятора

Точка пересечения с осью  $U(I = 0, R = \infty, \text{ режим холостого хода})$  дает величину ЭДС, а точка пересечения с осью  $I(U = 0, R = 0, \text{ режим короткого замыкания})$  дает величину тока в нагрузке при сопротивлении внешней нагрузки, равном нулю. В этом случае:

$$E = I_K R_B \quad \text{и} \quad R_B = \frac{E}{I_K},$$

где  $I_K$  — ток короткого замыкания, А.

Если известна только часть внешней характеристики (рис. 2.1), то внутреннее сопротивление аккумулятора можно определить по формуле

$$R_B = \frac{\Delta U}{\Delta I}.$$

Важнейшими эксплуатационными параметрами аккумулятора являются также его зарядный и разрядный токи, максимальная мощность, отдаваемая в нагрузку, и коэффициент полезного действия. Эти величины указываются в паспортных данных аккумулятора.

Максимально возможный полезный заряд аккумулятора называется зарядной емкостью, или просто емкостью. Емкость аккумулятора — это заряд, отдаваемый полностью заряженным аккумулятором при разряде до наименьшего допустимого напряжения.

В системе СИ емкость аккумуляторов измеряют в кулонах, на практике часто используется внесистемная единица — ампер-час ( $1 \text{ А}\cdot\text{ч} = 3600 \text{ Кл}$ ). Емкость аккумулятора указывается производителем.



При практических расчетах величина зарядного тока принимается:

– для кислотных аккумуляторов, А:  $I_{зар} = \frac{Q}{10}$ ;

– для щелочных аккумуляторов, А:  $I_{зар} = \frac{Q}{4}$ .

Величина разрядного тока зависит от мощности нагрузки, а его номинальное значение равно примерно зарядному току. Максимальное значение разрядного тока для кислотных стартерных аккумуляторов равно:

$$I_{раз, max} = 3Q.$$

Коэффициент полезного действия аккумулятора равен отношению полезной мощности приемника ко всей мощности источника:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{EI} = \frac{U}{E} = \frac{E - IR_B}{E} = 1 - \frac{IR_B}{E}$$

или

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{UI}{EI} = \frac{R}{R + R_B} = \frac{1}{1 + R_B / R}.$$

Отсюда следует, что при холостом ходе ( $R = \infty$ ) КПД приближается к единице, при коротком замыкании ( $R = 0$ ) он равен нулю, в согласованном режиме ( $R = R_B$ ) он равен 0,5.

При режиме отдачи максимальной мощности, т.е.  $I = E/2R_{BH}$ , получим:

$$\eta = 1 - \frac{R_B E}{2R_B E} = 0,5.$$

Такой низкий КПД недопустим в электрических установках большой мощности. Поэтому стремятся, чтобы внутреннее сопротивление источника было значительно меньше сопротивления приемника.

В ряде случаев один аккумулятор не обеспечивает нормальную работу потребителя. В этом случае используют последовательное, параллельное и смешанное соединения аккумуляторов.

При последовательном соединении величина тока в нагрузке равна:

$$I = \frac{E_1 + E_2 + \dots + E_n}{R + R_1 + R_2 + \dots + R_n}.$$

Напряжения на зажимах источников соответственно равны:

$$U_1 = E_1 - IR_{B1}; \quad U_2 = E_2 - IR_{B2}; \quad \dots; \quad U_n = E_n - IR_{Bn}.$$

Напряжение на зажимах потребителя можно определить по следующим формулам:

$$U = \Sigma E_i - \Sigma IR_i; \quad U = U_1 + U_2 + \dots + U_n,$$

из которых видно, что при последовательном соединении аккумуляторов в батарее режимы эксплуатации (ток заряда и разряда) в значительной степени зависят от внутреннего сопротивления наихудшего элемента. Увеличение внутреннего сопротивления приводит к увеличению потерь в аккумуляторе и невозможности создания необходимых зарядных и разрядных токов.

При параллельном соединении аккумуляторы соединяются между собой зажимами одинаковой полярности, и ток в нагрузке определяется по первому закону Кирхгофа:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n,$$

где  $I$  — ток в нагрузке, А;

$I_1, \dots, I_n$  — токи источников, А.

При параллельном соединении аккумуляторов анализ их работы следует вести, используя метод узловых потенциалов. Напряжение на зажимах приемников равно:

$$U = \frac{\Sigma E_i G_i}{\Sigma G_i},$$

где  $E_i$  — ЭДС  $i$ -го источника, В;

$G_i$  — проводимость  $i$ -й параллельной ветви, См.

Токи в ветвях определяются по закону Ома:

$$I = \frac{E_i - U}{R_i} = (E_i - U) G_i.$$

Из формулы видно, что токи в ветвях распределяются обратно пропорционально сопротивлениям ветвей. Поэтому если параллельно соединены два аккумулятора с равными ЭДС и разными внутренними сопротивлениями (различное техническое состояние аккумуляторов), то ток нагрузки будет распределяться между ними обратно пропорционально их внутренним сопротивлениям:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1}.$$

При неравных ЭДС один из источников может работать в режиме приемника электрической энергии (ток со знаком «минус»), что приведет к саморазряду аккумулятора-источника даже при отключенной нагрузке.

Данные теории и практики указывают на то, что ЭДС аккумулятора  $E$ , В не зависит от размера пластин, но изменяется в зависимости от плотности электролита согласно эмпирической формуле

$$E = 0,84 + \gamma,$$

где  $\gamma$  — плотность электролита при 15 °С, г/см<sup>3</sup>.

Поскольку процессы заряда и разряда аккумулятора сопровождаются изменением плотности электролита, ЭДС и напряжение аккумулятора тоже должны изменяться. В процессе разряда начальное значение ЭДС аккумулятора при плотности электролита 1,28 г/см<sup>3</sup> составляет 2,1 В. Разряд аккумулятора следует прекращать, когда напряжение будет на 10...15% ниже номинального значения, что соответствует 1,7 В при плотности электролита 1,16 г/см<sup>3</sup>.

В стационарных условиях заряд аккумуляторных батарей проводят или при постоянном напряжении, или при постоянном токе. При этом в конце заряда допускают предельное значение напряжения, равное 2,5...2,6 В на аккумулятор или 15...15,6 В на батарею из шести элементов. Следовательно, напряжение зарядного устройства должно быть 15...16 В. На автомобиле в нормальных условиях величина напряжения генератора не превышает 14,4 В и ограничивает заряд в указанных пределах. Общее напряжение для заряда шестивольтовых батарей 7,5 В.

Для подсчета наибольшего возможного числа аккумуляторных батарей  $m$ , которые можно соединить последовательно в группу, следует учитывать напряжение зарядной сети и напряжение на один аккумулятор 2,7 В в конце заряда:

$$m = U_c / 2,7.$$

Достоинствами заряда при постоянном напряжении являются:

- возможность заряжать аккумуляторы различной емкости;
- заряд происходит быстрее (для получения 90-95% емкости требуется 4-5 часов);
- большой ток в начале заряда батарее не вредит, т.к. его величина быстро уменьшается;
- газообразование в конце заряда меньше, что благоприятно сказывается на пластинах.

Схема зарядки аккумулятора при  $U = \text{const}$  представлена на рисунке 2.2.

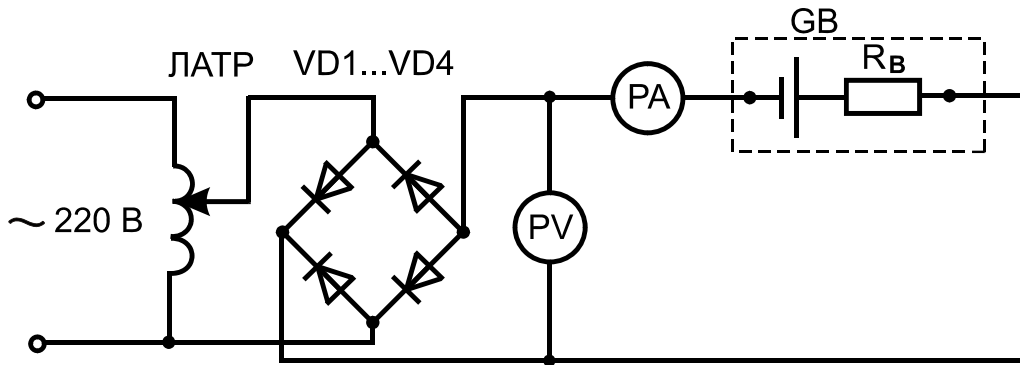


Рис. 2.2. Схема зарядки аккумулятора при  $U = const$

Величина тока зарядки при этом

$$I_{зар} = \frac{U_{зар} - E}{R_p - \Sigma R_B}$$

В процессе эксплуатации техническое состояние аккумуляторной батареи может быть проверено аккумуляторным пробником, например Э107, Ф108. Если напряжение отдельных аккумуляторов батареи отличается более чем на 0,1 В или в течение 5 с проверки оно падает, батарею следует зарядить или отправить в ремонт.

Степень разряженности батареи также определяется пробником.

Зависимость разрядки аккумулятора от напряжения на аккумуляторе приведена в таблице 2.1.

Таблица 2.1. Зависимость разрядки аккумулятора от напряжения на аккумуляторе

Напряжение на аккумуляторе, В	Разрядка аккумулятора, %
1,7...1,8	0 (полностью заряжен)
1,6...1,7	25
1,5...1,6	50
1,4...1,5	75

Электрические и эксплуатационные характеристики аккумулятора зависят от материала электродов и состава электролита. Сейчас наиболее распространены следующие аккумуляторы: свинцово-кислотные, никель-кадмиевые (NiCd), никель-металл-гидридные (NiMH), литий-ионные (Li-ion), литий-полимерные (Li-pol), никель-цинковые (NiZn).

По мере исчерпания химической энергии напряжение и ток падают, аккумулятор перестает действовать. Зарядить аккумулятор (батарею аккумуляторов) можно от любого источника постоянного тока с большим напряжением при ограничении тока. Наиболее распро-

страненным считается зарядный ток (в амперах) в 1/10 номинальной емкости аккумулятора (в ампер-часах). Многие типы аккумуляторов имеют различные ограничения, которые необходимо учитывать при зарядке и последующей эксплуатации, например NiMH-аккумуляторы чувствительны к перезаряду, литиевые — к переразряду, напряжению и температуре. NiCd- и NiMH-аккумуляторы имеют так называемый *эффект памяти*, заключающийся в снижении ёмкости, в случае когда зарядка осуществляется при не полностью разряженном аккумуляторе. Также эти типы аккумуляторов обладают заметным саморазрядом, то есть они постепенно теряют заряд, даже не будучи подключенными к нагрузке.

Для заряда аккумуляторов используется *зарядное устройство*. Зарядное устройство — электронное устройство для заряда электрических аккумуляторов энергией внешнего источника; как правило, от сети переменного тока напряжением 220 Вольт.

Оно включает в себя преобразователь напряжения (трансформатор, импульсный блок питания), выпрямитель, стабилизатор напряжения, устройство контроля процесса заряда, средства индикации (стрелочный или светодиодный амперметр). Характеристики зарядных устройств зависят от типа аккумуляторов, рабочего напряжения, номинальной емкости. Зарядные устройства могут быть встроенными и внешними.

### *Порядок выполнения работы*

1. Измерить ЭДС исследуемых источников.
2. Собрать схему зарядки аккумулятора согласно рисунку 2.2. В схеме предусмотреть источник постоянного напряжения 12 В (лабораторный автотрансформатор с выпрямителем), вольтметр постоянного тока 7,5...60 В, амперметр постоянного тока на 5 А.
3. Определить номинальные зарядный и разрядный токи источников.
4. Определить ток и напряжение в процессе зарядки аккумулятора. Результаты измерений занести в таблицу 2.2.

*Таблица 2.2. Результаты исследования аккумулятора в режиме зарядки*

Параметры	Время зарядки, мин		
	1	5	10
$U, В$			
$I, А$			

5. Собрать схему исследований согласно рисунку 2.3.

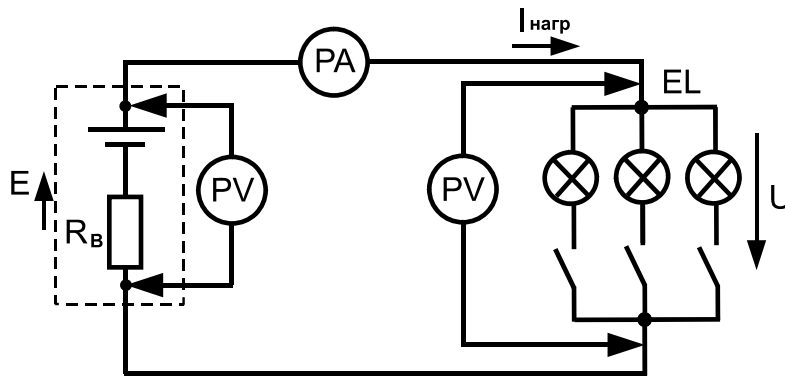


Рис. 2.3. Схема разрядки аккумулятора

Подключая к аккумулятору различные виды ламповой нагрузки, снять внешнюю характеристику. Данные занести в таблицу 2.3.

Таблица 2.3. Результаты опытных данных для построения внешней характеристики

№ опыта	Из опыта			Из расчета					
	$E$ В	$U$ В	$I$ А	$IR_B$ В	$R_B$ Ом	$P_1$ Вт	$P_2$ Вт	$\Delta P$ Вт	$\eta$ –
1									
2									
3									

6. Построить внешнюю характеристику. Определить ток короткого замыкания аккумулятора.
7. Определить внутреннее сопротивление, потери мощности и КПД источников при номинальном разрядном токе.

#### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные приборов и оборудования, используемых в работе.
3. Принципиальные электрические схемы зарядки и разрядки аккумулятора.
4. Таблицы с результатами измерений и вычислений.
5. Внешняя характеристика аккумулятора.
6. Выводы по работе.

### *Контрольные вопросы*

1. Какие системы электроизмерительных приборов могут быть использованы при измерениях в цепях постоянного тока?
2. Как измерить ЭДС на зажимах аккумулятора?
3. Как определить внутреннее сопротивление источника?
4. Как рассчитать потери и КПД источника?
5. Как определить напряжение на зажимах потребителя при параллельном соединении аккумуляторов?
6. При каких условиях два аккумулятора, включенные параллельно, будут саморазряжаться при отключенной нагрузке?
7. Как определить зарядный ток аккумулятора при их последовательном соединении к зарядному устройству?
8. Приведите начальные и конечные значения плотности электролита одного элемента кислотного аккумулятора.
9. Приведите предельное значение напряжения на одном элементе кислотного аккумулятора в конце заряда.
10. Как рассчитать величину добавочного сопротивления при заряде 12-вольтового аккумулятора от 24-вольтового?
11. Как определить полярность клемм аккумуляторной батареи?
12. При каких значениях напряжений батарея не допускается к эксплуатации?
13. Какие правила техники безопасности нужно соблюдать при работе с аккумуляторной батареей?
14. Охарактеризуйте режим зарядки аккумулятора при постоянном напряжении.
15. Охарактеризуйте режим зарядки аккумулятора при постоянном токе.
16. Какие электроизмерительные приборы применяются при проверке работоспособности аккумулятора?
17. Как определить номинальный разрядный ток аккумулятора?
18. Приведите несколько марок аккумуляторов и дайте их расшифровку.
19. Как рассчитать сопротивление нагрузки потребителя?
20. Как рассчитать количество тепла, выделяющееся в аккумуляторе при его работе?
21. Почему при разряде аккумулятора плотность электролита уменьшается?
22. Приведите выражение законов Ома и Кирхгофа для исследуемой схемы.

23. Какие источники электрической энергии вы знаете? Какие виды энергии они используют?
24. Какие режимы работы источников вам известны?
25. Каковы характерные особенности режима холостого хода?
26. Каковы характерные особенности режима короткого замыкания?
27. Что называется внешней характеристикой источника и каково ее назначение?
28. Что такое зарядная емкость аккумулятора?
29. Какие типы аккумуляторов наиболее распространены?
30. Что такое зарядное устройство, из каких элементов оно состоит?

*Список рекомендованных источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 15-25, 252-254.
2. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 15-22, 32-35.
3. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — С. 14-34.



### Лабораторная работа 3

#### Определение параметров катушки индуктивности

*Цель работы:* экспериментальное определение активного сопротивления и индуктивности катушки.

#### *Основные теоретические сведения*

Одним из основных элементов конструкции различного рода электрических машин и аппаратов, устройств электроавтоматики, промышленной электроники, транспортных средств и т.п. является *катушка индуктивности*. Она применяется для подавления помех, сглаживания пульсаций, накопления энергии, ограничения переменного тока, в резонансных (колебательный контур) цепях, для создания магнитных полей, датчиков перемещений и так далее.

Конструктивно выполняется в виде винтовых или винтоспиральных (диаметр намотки изменяется по длине катушки) катушек однослойных или многослойных намоток изолированного одножильного или многожильного проводника на диэлектрическом каркасе круглого, прямоугольного или квадратного сечения, часто на тороидальном каркасе или, при использовании толстого провода и малом числе витков, — без каркаса.

На печатных платах электронных устройств также иногда делают плоские «катушки» индуктивности: геометрия печатного проводника выполняется в виде круглой или прямоугольной спирали, волнистой линии или в виде меандра. Такие «катушки индуктивности» часто используются в сверхбыстродействующих цифровых устройствах для выравнивания времени распространения группы сигналов по разным печатным проводникам от источника до приемника.

Произвольное изменение параметров катушки в производственных условиях может оказать существенное влияние на ход технологического процесса или сделать его вообще невозможным. Поэтому технический персонал предприятия должен знать основные методы контроля технического состояния катушек индуктивности.

При протекании тока по виткам катушки с поперечным сечением магнитопровода  $S$  создается магнитное поле, интенсивность которого характеризуется магнитной индукцией  $B$  и магнитным потоком  $\Phi = BS$ , который пропорционален магнитодвижущей силе  $F$ , равной произведению тока катушки  $I$  и числа ее витков  $w$ . Зависимость  $\Phi(I)$  при  $w = \text{const}$  катушки при отсутствии ферромагнитного магнитопровода является *линейной*.

При наличии магнитопровода магнитный поток, создаваемый подобной катушкой индуктивности (дросселем), при прочих равных условиях значительно возрастает, так как при этом магнитный поток создается не только непосредственно проводником с током катушки (источником внешнего магнитного поля), но и соответствующим ферромагнитным веществом магнитопровода (источником внутреннего магнитного поля).

При включении катушки индуктивности с магнитопроводом (в общем случае — с воздушным зазором  $\delta$ ) под переменное синусоидальное напряжение в цепи катушки появляется переменный ток, под действием которого в магнитопроводе возникает переменный магнитный поток  $\Phi(t)$ . Основная часть результирующего магнитного потока замыкается по цепи магнитопровода, так как магнитная проницаемость его во много раз больше магнитной проницаемости воздуха. Однако незначительная часть результирующего потока (порядка 3...5%) рассеивается и замыкается вокруг отдельных витков катушки индуктивности. Из курса физики известно, что для ферромагнитных материалов существует нелинейная зависимость между величиной магнитной индукции  $B$  и напряженностью магнитного поля  $H$ , создаваемого катушкой индуктивности. Эта зависимость  $B(H)$  — кривая намагничивания, является одной из важнейших характеристик ферромагнитных материалов.

Основными параметрами катушки являются *активное сопротивление* и *индуктивность*.

*Активное сопротивление*  $R$ , Ом, зависит от длины, площади поперечного сечения  $S$  и удельного сопротивления проводника  $\rho$ :

$$R = \rho \frac{l}{S}.$$

Активное сопротивление катушки можно измерить омметром методом амперметра-вольтметра или при помощи измерительных мостов. Измерения проводят на постоянном токе.

Активное сопротивление катушки при переменном токе будет несколько больше того значения, которое получается при постоянном токе. Это обусловлено поверхностным эффектом, который сказывается особенно заметно при высокой частоте тока и большой площади поперечного сечения проводника. При промышленной частоте 50 Гц поверхностный эффект заметно проявляется в стальных (ферромагнитных) проводниках, а в проводниках из цветных металлов он настолько слаб, что его не учитывают.

При работе катушки в цепях переменного тока следует учитывать ее *индуктивное сопротивление*, Ом:

$$X_L = 2\pi fL,$$

где  $f$  — частота тока, Гц;

$L$  — индуктивность катушки, Гн.

Индуктивность катушки зависит от числа витков, размеров и формы катушки, а также от магнитной проницаемости материала, из которого изготовлен сердечник, размеров и конфигурации магнитопровода. Так, например, индуктивность тороидальной катушки с сердечником любого сечения может быть определена по формуле, Гн:

$$L = 0,4\pi W^2 \mu \frac{S}{l_{CP}} 10^{-8},$$

где  $W$  — число витков катушки;

$\mu$  — магнитная проницаемость сердечника;

$S$  — площадь поперечного сечения сердечника, см<sup>2</sup>;

$l_{CP}$  — средняя длина магнитной силовой линии, см.

Вследствие того, что индуктивность катушки, снабженной ферромагнитным сердечником, — величина переменная, зависящая от тока (вследствие непостоянства магнитной проницаемости), ее обычно определяют опытным путем. Если неизвестен какой-либо параметр катушки ( $I$ ,  $W$ ,  $S$ ,  $\mu$ ), то этот метод является единственно возможным.

При экспериментальном определении индуктивности катушки дополнительно предоставляется возможность оценить ее техническое состояние. В этом случае опытные данные сравниваются с паспортными или с данными, полученными на образцовой (исправной) катушке. Таким образом, можно выявить такую распространенную неисправность, как витковое замыкание в катушке. Измерения индуктивности в катушке производятся специализированными приборами, измерителями RLC методом амперметра-вольтметра на переменном токе.

### **Разновидности катушек индуктивности**

Контурные катушки индуктивности, используемые в радиотехнике. Эти катушки используются совместно с конденсаторами для организации резонансных контуров. Они должны иметь высокую термо- и долговременную стабильность, требования к паразитной емкости обычно несущественны.

Катушки связи или трансформаторы связи. Взаимодействующие магнитными полями пара и более катушек обычно включаются параллельно конденсаторам для организации колебательных контуров. Такие катушки применяются для обеспечения трансформаторной связи между отдельными цепями и каскадами, что позволяет разделить по постоянному току, например, цепь базы последующего усилительного каскада от коллектора предыдущего каскада и т.д. Нерезонансные разделительные трансформаторы выполняются из тонкого провода в виде двух обмоток небольших габаритов. Основными параметрами этих катушек являются индуктивность и коэффициент связи (коэффициент взаимоиндукции).

Вариометры. Это катушки, индуктивностью которых можно управлять (например, для перестройки частоты резонанса колебательных контуров) изменением взаимного расположения двух катушек, соединенных последовательно. Одна из катушек неподвижная (статор), другая обычно располагается внутри первой и вращается (ротор). Существуют и другие конструкции вариометров. При изменении положения ротора относительно статора изменяется степень взаимоиндукции, а следовательно, индуктивность вариометра. Такая система позволяет изменять индуктивность в 4-5 раз. В ферровариометрах индуктивность изменяется перемещением ферромагнитного сердечника относительно обмотки либо изменением длины воздушного зазора замкнутого магнитопровода.

Дроссели. Это катушки индуктивности, обладающие высоким сопротивлением переменному току и малым сопротивлением постоянному. Дроссели включаются последовательно с нагрузкой для ограничения переменного тока в цепи, они часто применяются в цепях питания радиотехнических устройств в качестве фильтрующего элемента, а также в качестве балласта для включения разрядных ламп в сеть переменного напряжения. Для сетей питания с частотами 50-60 Гц выполняются на сердечниках из трансформаторной стали. На более высоких частотах также применяются сердечники из пермаллоя или феррита.

Сдвоенные дроссели. Это две намотанных встречно или согласованно катушки индуктивности, используются в фильтрах питания. За счет встречной намотки и взаимной индукции более эффективны для фильтрации синфазных помех при тех же габаритах. При согласной намотке эффективны для подавления дифференциальных

помех. Сдвоенные дроссели получили широкое распространение в качестве входных фильтров блоков питания; в дифференциальных сигнальных фильтрах цифровых линий, а также в звуковой технике. Предназначены как для защиты источников питания от попадания в них наведенных высокочастотных сигналов из питающей сети, так и во избежание проникновения в питающую сеть электромагнитных помех, генерируемых устройством. На низких частотах используются в фильтрах цепей питания и обычно имеют ферромагнитный сердечник (из трансформаторной стали). Для фильтрации высокочастотных помех — сердечник ферритовый.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему для измерения активного сопротивления катушки индуктивности согласно рисунку 3.1. После проверки схемы преподавателем включить ее в сеть и, изменяя напряжение при помощи автотрансформатора ЛАТР, снять 5-6 значений тока и напряжения на катушке. Данные занести в таблицу 3.1.

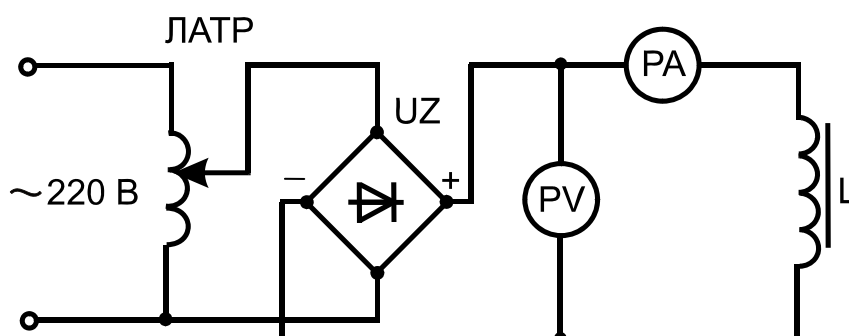


Рис. 3.1. Электрическая схема для измерения активного сопротивления катушки индуктивности

**Внимание!** Не подавать на катушку силу тока свыше 3 А во избежание выхода ее из строя.

Таблица 3.1. Результаты измерения активного сопротивления катушки индуктивности

Параметры	Значения					
$U, В$						
$I, А$						
$R, Ом$						

2. Определить активное сопротивление катушки  $R$ .

3. Собрать схему для измерения полного сопротивления катушки индуктивности согласно рисунку 3.2. После проверки схемы преподавателем включить ее в сеть и снять 5-6 значений тока и напряжения аналогично предыдущему опыту. Данные занести в таблицу 3.2.

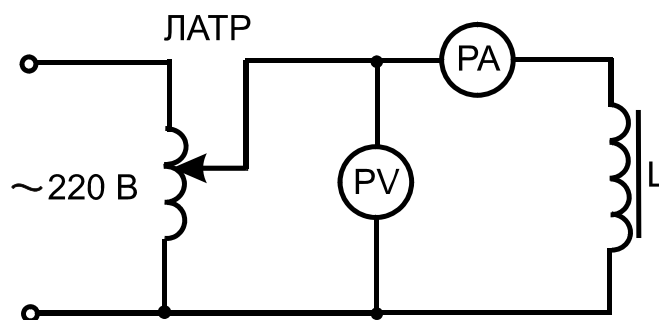


Рис. 3.2. Электрическая схема для измерения полного сопротивления катушки индуктивности

Таблица 3.2. Результаты исследования катушки индуктивности на переменном токе

Измерено		Вычислено			
$U, В$	$I, А$	$Z, Ом$	$X_L, Ом$	$L, Гн$	$\cos \varphi$

4. Вычислить полное сопротивление катушки, Ом:

$$Z = \frac{U}{I}.$$

5. Вычислить индуктивное сопротивление катушки  $X_L$  на основе треугольника сопротивлений (рис. 3.3), Ом:

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

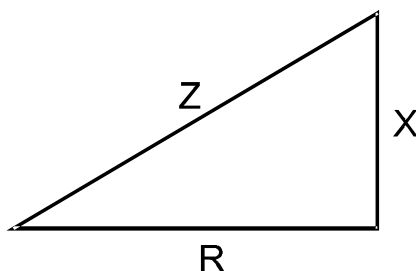


Рис. 3.3. Треугольник сопротивлений

6. Вычислить индуктивность катушки, Гн:

$$L = \frac{X_L}{2\pi f}.$$

7. По результатам одного из опытов построить в масштабе треугольник сопротивлений.

### *Содержание отчета*

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные приборов и оборудования, используемых в работе.
3. Принципиальные электрические схемы измерения активного и полного сопротивлений катушки индуктивности.
4. Таблицы с результатами измеренных и вычисленных значений.
5. Треугольник сопротивлений.
6. Выводы по работе.

### *Контрольные вопросы*

1. Как определяется сопротивление катушки индуктивности?
2. Как определяется полное сопротивление катушки индуктивности?
3. Как определяется индуктивное сопротивление катушки индуктивности?
4. Что произойдет с углом сдвига фаз между напряжением и током в катушке, если увеличить частоту тока, удалить из катушки сердечник?
5. Объясните назначение магнитопровода в катушке индуктивности.
6. Поясните влияние магнитопровода на значение индуктивности в катушке.
7. Как изменится величина тока в катушке индуктивности при питании ее от сети постоянного тока и от сети переменного тока одной и той же величины напряжения?
8. Почему магнитопровод катушек индуктивности, работающих в цепях переменного тока, изготавливается из листовой электротехнической стали?
9. Изобразите кривую перемагничивания ферромагнитного материала (петля гистерезиса) и укажите ее характерные точки.
10. Каковы характерные неисправности катушки индуктивности с ферромагнитным сердечником?
11. Приведите методы поиска различных неисправностей катушек индуктивности.

12. Катушку индуктивности с ферромагнитным сердечником включили под напряжение. Через некоторое время из нее пошел дым. Приведите возможные причины.
13. Объясните, почему индуктивность катушки с ферромагнитным сердечником уменьшается при увеличении тока.
14. Приведите примеры устройств с катушками индуктивности и объясните их назначение.
15. Приведите формулы, которые связывают магнитную индукцию и напряженность магнитного поля в вакууме и в ферромагнитном материале. Назовите единицы измерения и объясните их применение.
16. Назовите разновидности катушек индуктивности.

*Список рекомендуемых источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 7-12, 143-149.
2. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 164-167.
3. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 51-56.
4. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — С. 67-81.



## Лабораторная работа 4

### Исследование неразветвленной электрической цепи

*Цель работы:* проверка основных положений для цепи переменного тока, содержащей активное и реактивное сопротивление. Исследование схемы как модели линии передачи переменного тока, выяснение зависимости потери напряжения от величины нагрузки.

#### *Основные теоретические сведения*

Электрическая цепь, содержащая индуктивность и емкость, может служить колебательным контуром, где возникает процесс колебаний электрической энергии, переходящей из индуктивности в емкость и обратно. В идеальном колебательном контуре эти колебания будут незатухающими. При подсоединении колебательного контура к источнику переменного тока угловая частота источника может оказаться равной угловой частоте, с которой происходят колебания электрической энергии в контуре. В этом случае имеет место явление резонанса, т. е. совпадения частоты свободных колебаний, возникающих в какой-либо физической системе, с частотой вынужденных колебаний, сообщаемых этой системе внешними силами.

Резонанс в электрической цепи можно получить тремя способами: изменяя угловую частоту источника переменного тока, индуктивность  $L$  или емкость  $C$ . Различают резонанс при последовательном соединении  $L$  и  $C$  — *резонанс напряжений* и при параллельном их соединении — *резонанс токов*. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется *резонансной, или собственной частотой колебаний резонансного контура*.

В неразветвленной электрической цепи переменного тока, содержащей активно-реактивные элементы, напряжение питающей сети равно векторной сумме напряжений, действующих на участках цепи. В соответствии с этим выражение для напряжения, подводимого к электрической цепи, может быть записано по второму закону Кирхгофа в комплексной (векторной) форме:

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L - \dot{U}_C = R \dot{I} + jX_L \dot{I} - jX_C \dot{I},$$

где  $\dot{U}_R, \dot{U}_L, \dot{U}_C$  — комплексные напряжения на участках цепи;

$X_L, X_C$  — комплексные реактивные сопротивления:

$$X_L = 2\pi fL, \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC},$$

где  $f$  — частота питающего напряжения, Гц;

$L$  — индуктивность катушки, Гн;

$C$  — емкость конденсатора, Ф.

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

Вектор напряжения  $U_R$  на активном сопротивлении при этом совпадает с вектором тока  $I$ . Угол  $\varphi$  — угол между векторами тока и напряжения, подводимого к цепи (откладывается от вектора тока к вектору напряжения). Построенная таким образом векторная диаграмма для электрической активно-индуктивно-емкостной цепи (треугольник напряжений) представлена на рисунке 4.1.

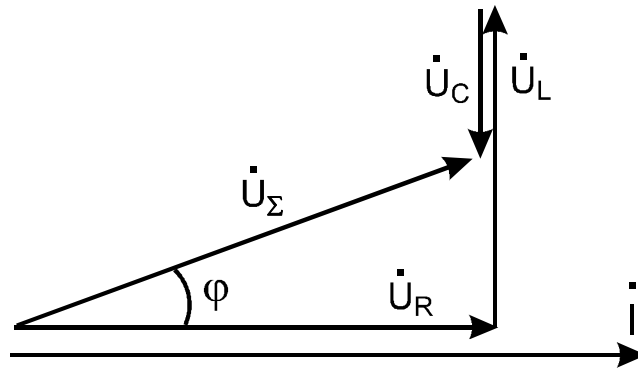


Рис. 4.1. Векторная диаграмма напряжений для активно-индуктивно-емкостной цепи

Из треугольника напряжений можно получить треугольник сопротивлений для рассматриваемой цепи, разделив стороны этого треугольника на комплексный ток (рис. 4.2, а), из которого следует, что:

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}; \quad \sin \varphi = \frac{X}{Z}; \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{X}{R}. \quad (1)$$

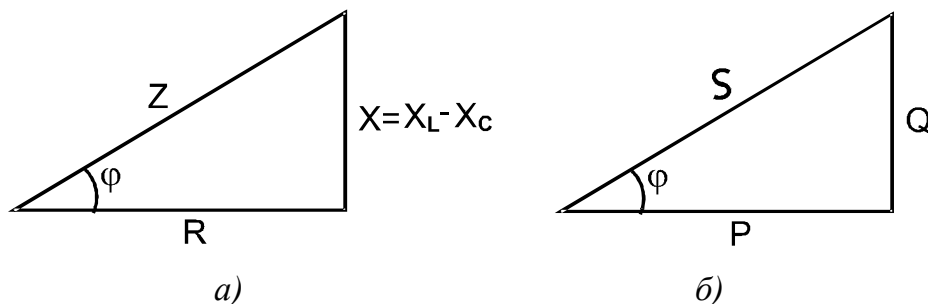


Рис. 4.2. Треугольники сопротивлений (а) и мощностей (б)

Полученные выражения (1) показывают, что угол сдвига фаз  $\varphi$  между током  $I$  и напряжением  $U$  питающей сети зависит от характера сопротивлений, включенных в цепь переменного тока.

Умножив стороны треугольника сопротивлений на квадрат тока в цепи, получим треугольник мощностей (рис. 4.2, б). Активная мощность переменного тока:

$$P = S \cos \varphi,$$

или

$$P = \sqrt{S^2 - Q^2}.$$

Из треугольников сопротивлений и мощностей можно установить взаимосвязь между параметрами электрической цепи:

$$\begin{aligned} Z &= \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}, \\ P &= S \cos \varphi, \quad Q = S \sin \varphi, \quad S = \sqrt{P^2 + Q^2}, \\ Q &= Q_L - Q_C. \end{aligned}$$

Применяя закон Ома, можно записать формулы для расчета мощностей:

$$\begin{aligned} S &= I^2 Z = U^2 / Z; & P &= I^2 R = U^2 / R; \\ Q_L &= I^2 X_L = U_L^2 / X_L; & Q_C &= I^2 X_C = U_C^2 / X_C. \end{aligned}$$

В неразветвленной электрической цепи при равенстве индуктивного и емкостного сопротивлений ( $X_L = X_C$ ) разность фаз напряжения и тока на входе цепи равна нулю, и полное сопротивление цепи:

$$Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2} = R, \quad \text{тогда } I = \frac{U}{R} \text{ и } U_L = U_C.$$

Это состояние цепи называется *резонансом напряжений*.

Анализ представленных выражений показывает, что резонанс напряжений характеризуется рядом существенных факторов.

1. При резонансе напряжений полное сопротивление электрической цепи переменного тока принимает минимальное значение и оказывается равным ее активному сопротивлению.

2. Из этого следует, что при малом значении активного сопротивления ток может достигать большого значения.

3. Коэффициент мощности при резонансе

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{R}{R} = 1$$

принимает наибольшее значение, которому соответствует угол  $\varphi = 0$ . Это означает, что вектор тока  $I$  и вектор напряжения  $U$  совпадают по направлению.

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

$$Q = Q_L - Q_C = 0.$$

При этом реактивная индуктивная и реактивная емкостная составляющие полной мощности  $Q_L = Q_C = X_L I^2 = X_C I^2$  могут приобретать теоретически, в зависимости от значения тока и реактивных сопротивлений, величину большую, чем полная мощность  $S$ .

5. При резонансе напряжений напряжения на емкости и индуктивности оказываются равными  $U_C = U_L = X_C I = X_L I$  и, в зависимости от тока и реактивных сопротивлений, могут превышать напряжение питающей сети в  $X_L/R$  раз, если  $X_L > R$ . При этом напряжение на активном сопротивлении оказывается равным напряжению питающей сети, т.е.  $U_R = U$ .

Резонанс напряжений в промышленных электрических установках — нежелательное и опасное явление, так как он может привести к аварии вследствие недопустимого перегрева отдельных элементов электрической цепи или к пробоем изоляции обмоток электрических машин и аппаратов, изоляции кабелей и конденсаторов при возможном перенапряжении на отдельных участках цепи.

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

6. Исследование резонансных явлений в электротехнических устройствах удобно проводить с использованием резонансных кривых: изменение тока, коэффициента мощности, напряжения на катушке, напряжения на батарее конденсаторов и полного сопротивления электрической цепи в зависимости от емкости конденсаторов. В радиотехнических устройствах резонансные кривые строятся также в зависимости от индуктивности катушки или частоты входного сигнала.

### *Порядок выполнения работы*

1. Собрать электрическую цепь согласно рисунку 4.3. Для измерения напряжения предусмотреть два вольтметра на 300 и 60 В со свободными концами. Питание электрической цепи осуществлять от лабораторного автотрансформатора (ЛАТРа), расположенного на панели лабораторного стенда. Перед включением необходимо убедиться, что ручка ЛАТРа находится в крайнем левом положении.

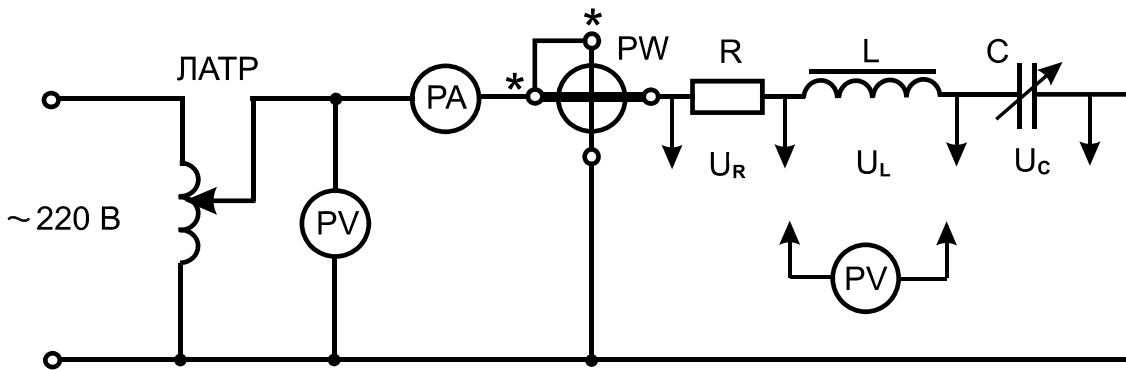


Рис. 4.3. Электрическая схема исследования неразветвленной электрической цепи

2. После проверки преподавателем схемы включить ее под напряжение. Установить ЛАТРОм величину напряжения 120...130 В.

3. Изменяя емкость конденсаторной батареи, произвести измерения необходимых величин (4...5 опытов). Результаты измерений занести в таблицу 4.1.

Таблица 4.1. Результаты исследования неразветвленной электрической цепи

Измерено							Вычислено						
$C$ , мкФ	$U$ , В	$U_R$ , В	$U_L$ , В	$U_C$ , В	$I$ , А	$P$ , Вт	$R$ , Ом	$R_L$ , Ом	$Z_L$ , Ом	$Z$ , Ом	$X_C$ , Ом	$X_L$ , Ом	$\cos \varphi$

Вычисление параметров цепи производить по формулам:

$$Z = \frac{U}{I}; \quad Z_L = \frac{U_L}{I}; \quad R = \frac{U_R}{I}; \quad R + R_L = \frac{P}{I^2};$$

$$X_L = \sqrt{Z_L^2 - R_L^2}; \quad U_L = IX_L; \quad \cos \varphi = \frac{P}{UI};$$

$$X_L = 2\pi fL; \quad X_C = \frac{1}{2\pi fC}.$$

4. По полученным данным построить треугольники напряжений для трех случаев  $X_L > X_C$ ;  $X_L = X_C$ ;  $X_L < X_C$ .

#### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные приборов и оборудования, используемых в работе.

3. Принципиальная электрическая схема исследования.
4. Таблица с результатами измеренных и вычисленных значений.
5. Векторные диаграммы (треугольники напряжений).
6. Выводы по работе.

### *Контрольные вопросы*

1. Запишите формулы для расчета  $R$ ,  $R_L$ ,  $L$ ,  $Z$ ,  $C$ ,  $\omega$ ,  $\cos \varphi$ , если известны показания амперметра, вольтметра, ваттметра.
2. Изобразите векторную диаграмму цепи с  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементами при резонансе напряжений.
3. Запишите зависимости между  $R$ ,  $X_L$ ,  $X_C$ ,  $U_L$ ,  $U_C$ ,  $\cos \varphi$  при резонансе напряжений.
4. Может ли быть величина напряжения на индуктивности, активном сопротивлении, емкости больше величины питающего напряжения? Заключение по данному вопросу подтвердить примером.
5. Изобразить треугольники напряжений, сопротивлений и мощностей для цепи с  $R$ ,  $L$ ,  $C$  элементами. Напишите зависимости между величинами и приведите примеры их практического применения.
6. В чем заключается явление резонанса и при каких условиях оно возникает?
7. Какую опасность представляет резонанс напряжений для электротехнических устройств?
8. Изменением каких параметров электрической цепи можно получить резонанс напряжений?
9. С помощью каких приборов и по какому признаку можно судить о возникновении резонанса напряжений в электрической цепи?
10. Приведите анализ построенных векторных диаграмм до и после резонанса напряжений и дайте объяснение, в каком случае напряжение опережающее, а в каком — отстающее.
11. К чему приводит изменение активного сопротивления электрической цепи при резонансе напряжений?
12. Сохранится ли резонанс напряжений, если изменить величину напряжения питающей сети?
13. Можно ли получить резонанс напряжений путем изменения параметров питающего напряжения?
14. Приведите примеры электротехнических и электронных устройств, в которых используется явление резонанса напряжений.
15. Когда в колебательном контуре возникает резонанс?

*Список рекомендованных источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 73.
2. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 44-51, 64-67.
3. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 66-75.
4. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — С. 130-142, 175-178.

## Лабораторная работа 5

### Компенсация реактивной мощности

*Цель работы:* ознакомление с методом повышения коэффициента мощности электрической цепи путем включения конденсаторов параллельно с нагрузкой. Выявление эффективности повышения коэффициента мощности.

#### *Основные теоретические сведения*

Приемники электрической энергии при своей работе потребляют из сети активную и реактивную мощности. При синусоидальном характере передачи мощности положительные полуволны характеризуют передачу мощности от источника потребителю. При отрицательных полуволнах происходит возврат энергии от потребителя к источнику. Совокупная полная мощность, характеризующая перетоки в энергосистеме, разделяется на активную и реактивную составляющие.

Генерация активной составляющей связана с потреблением мощности нагрузкой и выполнением полезной работы. На выработку активной мощности затрачивается определенный объем первичного энергоносителя на электростанциях. Вторая составляющая связана с обменом энергией между системой и источником.

Появление реактивной мощности связано с наличием в системе элементов, способных накапливать и отдавать электроэнергию. Таковыми элементами являются: протяженные линии высокого и сверхвысокого напряжения, конденсаторы связи, кабельные линии, шунтирующие конденсаторы, обладающие значительной емкостью.

Другие потребители имеют, наоборот, индуктивный характер нагрузки, к таким элементам относятся: асинхронные двигатели, печи индукционного нагрева, трансформаторы, реакторы.

Наиболее распространенными приемниками электрической энергии являются асинхронные электродвигатели, трансформаторы и др. Они требуют для своей работы создания магнитного поля — вращающееся магнитное поле электрических машин и переменный магнитный поток трансформаторов. Величина тока, необходимая для создания магнитного поля, зависит от индуктивного сопротивления потребителя электрической энергии и его нагрузки во время работы.

Эффективность использования электрической установки определяется по отношению активной мощности  $P$  к полной мощности  $S$ , потребляемой приемником из сети. Это отношение называется *коэффициентом мощности*. Из треугольника мощностей (рис. 5.1) видно, что:

$$\frac{P}{S} = \cos \varphi .$$



Тогда  $P = S \cos \varphi = UI \cos \varphi$ , а ток в нагрузке  $I = \frac{P}{U \cos \varphi}$ .

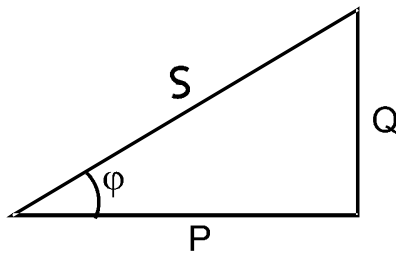


Рис. 5.1. Треугольник мощностей

При заданной активной мощности  $P(U = \text{const})$  ток обычно пропорционален  $\cos \varphi$ , т.е. реактивный ток при уменьшении  $\cos \varphi$  возрастает за счет индуктивной составляющей  $I_P = I \sin \varphi$ , являясь носителем реактивной энергии. Увеличение тока в нагрузке, вызванное уменьшением  $\cos \varphi$ , неизбежно приводит к дополнительной потере электроэнергии во всех элементах системы электроснабжения: в проводах линии электропередач ( $Q = RI^2$ ), в трансформаторах, в обмотках генераторов. Увеличение тока в нагрузке приводит к дополнительному увеличению падения напряжения в обмотках генераторов и трансформаторов, в проводах сети с сопротивлением  $Z(U = ZI)$ . Все это приводит к снижению КПД энергосистемы и напряжения на электроприемниках.

Для повышения  $\cos \varphi$  (уменьшения реактивной составляющей активно-индуктивной нагрузки) промышленных установок применяют различные меры, которые сводятся или к уменьшению потребления реактивной мощности  $Q_L$ , или к компенсации реактивной мощности  $Q_L$  мощностью  $Q_C$ . Так как емкостный ток  $I_C$  находится в противофазе с индуктивной составляющей тока нагрузки, то реактивная составляющая тока в линии  $I_P = I_L - I_C$  уменьшается. В результате ток в линии, угол сдвига фаз  $\varphi$  и реактивная мощность  $Q = UI \sin \varphi$  уменьшаются, а  $\cos \varphi$  увеличивается. Для осуществления этого мероприятия параллельно нагрузке подключают батареи конденсаторов или синхронные компенсаторы (синхронный электродвигатель в режиме перевозбуждения). Реактивная мощность по-прежнему поступает к потребителю, но уже не от генераторов, расположенных иногда за сотни километров, а от источника, находящегося рядом (например, конденсатора). Таким образом, происходит освобождение элементов системы электроснабжения от реактивной составляющей тока нагрузки.

Активная энергия преобразуется в полезную — механическую, тепловую и др. энергии. Реактивная энергия не связана с выполнением полезной работы, однако она необходима для создания электромагнитного поля, наличие которого является необходимым условием для работы электродвигателей и трансформаторов. Потребление реактивной мощности от энергоснабжающей организации нецелесообразно.

Уменьшение потребления реактивной мощности  $Q$  достигается за счет применения более современного оборудования, улучшения качества ремонта, ограничения работы оборудования на холостом ходу или с недогрузкой.

Для повышения коэффициента мощности и, следовательно, экономичности системы электроснабжения предприятий до недавнего времени нормировался минимально допустимый  $\cos \varphi$ , а в настоящее время устанавливается допустимое значение реактивной мощности и нормируемый  $\operatorname{tg} \varphi = Q/P$ , определяемый по показаниям счетчиков реактивной и активной энергии.

Мероприятия по компенсации реактивной мощности на предприятии позволяют:

- уменьшить нагрузку на трансформаторы, увеличить срок их службы;
- уменьшить нагрузку на провода, кабели, использовать их меньшего сечения;
- улучшить качество электроэнергии у электроприемников (за счет уменьшения искажения формы напряжения);
- уменьшить нагрузку на коммутационную аппаратуру за счет снижения токов в цепях;
- избежать штрафов за снижение качества электроэнергии пониженным коэффициентом мощности;
- снизить расходы на электроэнергию.

При компенсации реактивной энергии за счет установки конденсаторов их величина может быть определена по формуле,  $\Phi$ :

$$C = \frac{P}{2\pi f U^2} (\operatorname{tg} \varphi_1 - \operatorname{tg} \varphi_2),$$

где  $P$  — активная мощность потребителя, Вт;

$f$  — частота сети, Гц;

$U$  — напряжение сети, В;

$\operatorname{tg} \varphi_1$  — до компенсации;

$\operatorname{tg} \varphi_2$  — после компенсации.

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь согласно рисунку 5.2. Для измерения напряжения предусмотреть многопредельный вольтметр со свободными концами. В схеме катушка (сопротивления  $R_K$  и  $X_K$ ) имитирует нагрузку, а резистор (сопротивление  $R_L$ ) — линию. Измерение как активной, так и реактивной мощностей производится при помощи одного ваттметра, а переключение его с режима на режим осуществляется при помощи переключателя  $S$  (активная мощность — положение  $P$  и реактивная — положение  $Q$ ).

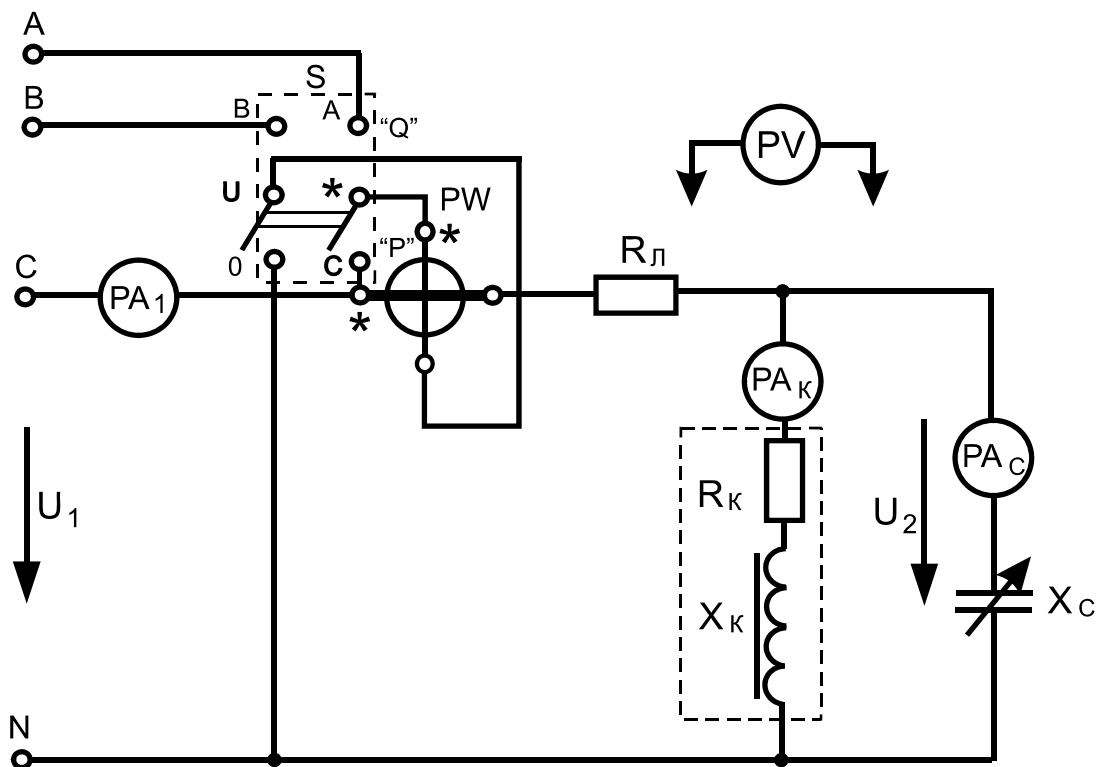


Рис. 5.2. Электрическая схема исследования цепи для компенсации реактивной мощности

2. Изменяя емкость конденсатора от нуля (конденсатор не включен) до значения, при котором емкостный ток  $I_C$  в 1,6...2 раза больше тока катушки  $I_K$ , проследить за изменениями показаний приборов. Отметить наступление резонанса токов (полной компенсации реактивной мощности), при этом ваттметр, включенный на режим измерения реактивной мощности, показывает, что из сети реактивная мощность не потребляется (его показание равно нулю).

Результаты замеров (4...5 точек) записать в таблицу 5.1.

Таблица 5.1. Результаты исследования компенсации реактивной мощности

Измерено									Вычислено			
$C,$ мкФ	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$U_L,$ В	$I_1,$ А	$I_K,$ А	$I_C,$ А	$P,$ Вт	$Q,$ ВАр	$Q_C,$ ВАр	$\cos \varphi$	$\Delta P,$ Вт	$\eta_L,$ %

3. Вычислить реактивную мощность включенной батареи конденсаторов  $Q_C$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , потери мощности в резисторе  $R_L$  —  $\Delta P$ , КПД линии  $\eta_L$ . Расчет производить по формулам:

$$Q_C = U_2 I_C, \quad \cos \varphi = \frac{P_1}{U_1 I_1},$$

$$\Delta P = I^2 R_L \text{ или } \Delta P = U_L I,$$

$$\eta_L = \frac{P_1 - \Delta P}{P_1} = \frac{P_2}{P_1}.$$

4. Построить векторные диаграммы (треугольники токов) для трех случаев: при отключенной конденсаторной батарее; при полной компенсации реактивной мощности ( $I_K = I_C$ ,  $Q = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$ ); при перекompенсации (мощность конденсаторов превышает индуктивную мощность нагрузки, и в сеть отдается емкостная мощность). Пример треугольника токов показан на рисунке 5.3.

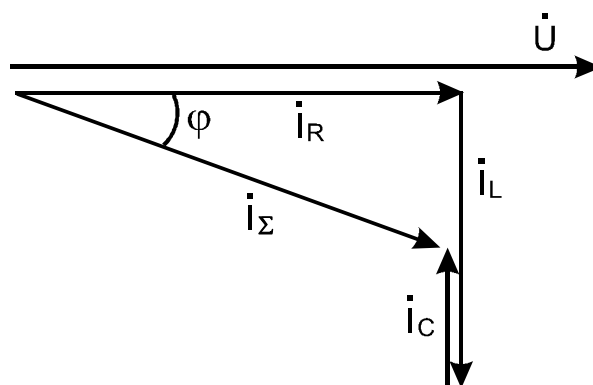


Рис. 5.3. Пример векторной диаграммы токов

### *Содержание отчета*

1. Наименование и цель работы.
2. Паспортные данные приборов и оборудования, используемых в работе.
3. Принципиальная электрическая схема исследования.
4. Таблица с результатами измеренных и вычисленных значений.
5. Векторные диаграммы (треугольники токов).
6. Выводы по работе.

### *Контрольные вопросы*

1. Какие причины вызывают уменьшение коэффициента мощности?
2. Для какой цели увеличивают коэффициент мощности в электрических цепях?
3. Что такое резонанс токов?
4. Как измеряют активную и реактивную мощности?
5. Почему падение напряжения в линии зависит от коэффициента мощности?
6. Поясните на примере, как зависит величина полной мощности источников электроэнергии от коэффициента мощности потребителя.
7. Объясните, что понимают под активной, реактивной и полной мощностями и укажите, по каким формулам они рассчитываются.
8. Напишите формулы для расчета сопротивления, токов, напряжений, мощностей для схемы исследований.
9. Приведите способы увеличения коэффициента мощности естественным путем.
10. Поясните с использованием векторных диаграмм, как зависит коэффициент мощности потребителя от величины активной (реактивной) составляющей тока нагрузки.
11. В электрической цепи (см. рис. 5.2) произвели полную компенсацию реактивной мощности. На основании показаний каких приборов можно сделать такое заключение? Объясните при помощи векторных диаграмм и с физической точки зрения.

### *Список рекомендуемых источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 84-85, 92-98.
2. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 68-71.
3. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 66-75.
4. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — С. 130-142, 187-195.

## Лабораторная работа 6

### Исследование цепи трехфазного тока при соединении потребителей по схеме «звезда»

*Цель работы:* исследование цепи трехфазного тока при соединении потребителей энергии по схеме «звезда» для различных режимов работы.

#### Основные теоретические сведения

Трехфазной системой переменного тока называется совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют три синусоидальные ЭДС одинаковой частоты  $E_A, E_B, E_C$ , сдвинутые по фазе на  $1/3$  периода и создаваемые одним источником электрической энергии. Трехфазная система электроснабжения — частный случай многофазных систем электрических цепей.

Обмотки фаз генератора имеют одинаковое число витков и выполняются из провода одинакового сечения, поэтому ЭДС, индуцированные в этих обмотках, равны по величине.

Если каждая из трех фаз генератора работает на отдельную нагрузку, то в этом случае имеет место *несвязанная трехфазная система*, в которой генератор соединен с нагрузкой шестью проводами (рис. 6.1).

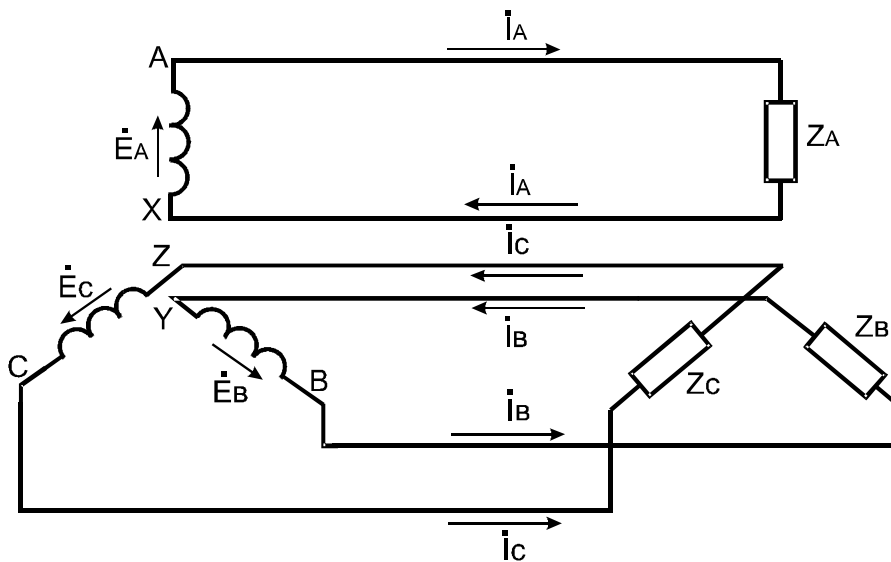


Рис. 6.1. Несвязанная трехфазная система

Такие системы неэкономичны и практического применения не имеют.

Можно назвать следующие преимущества трехфазных систем:

- Экономичность передачи электроэнергии на значительные расстояния.
- Меньшая материалоемкость трехфазных трансформаторов.
- Меньшая материалоемкость силовых кабелей, так как при одинаковой потребляемой мощности снижаются токи в фазах (по сравнению с однофазными цепями).
- Уравновешенность системы. Это свойство является одним из важнейших, так как в неуравновешенной системе возникает неравномерная механическая нагрузка на электрогенерирующую установку, что значительно снижает срок ее службы.
- Возможность простого получения кругового вращающегося магнитного поля, необходимого для работы электрического двигателя и ряда других электротехнических устройств. Двигатели трехфазного тока (асинхронные и синхронные) устроены проще, чем двигатели постоянного тока, одно- или двухфазные, и имеют высокие показатели экономичности.
- Возможность получения в одной установке двух рабочих напряжений (фазного и линейного) и двух уровней мощности.
- Возможность резкого уменьшения мерцания и стробоскопического эффекта светильников на люминесцентных лампах путем размещения в одном светильнике трех ламп (или групп ламп), питающихся от разных фаз.

Благодаря этим преимуществам, трехфазные системы наиболее распространены в современной электроэнергетике.

Соединение фаз генератора и нагрузки может осуществляться по схемам «звезда» и «треугольник». Если концы фаз генератора соединить в одну точку, а к началам подвести линейные провода, соединяющие генератор с нагрузкой, то такое соединение называется «звездой» и условно обозначается знаком « $\text{Y}$ » (рис. 6.2).

Чтобы соединить фазы по схеме «звезда», надо все концы фаз этого потребителя соединить в одну точку, а начала соединить линейными проводами с источником энергии.

Точки соединения концов фаз генератора  $N$  и нагрузки  $N'$  называются соответственно *нулевыми (нейтральными)* точками генератора и нагрузки.

Обе эти точки соединяются проводом, называемым *нулевым*, или *нейтральным*.



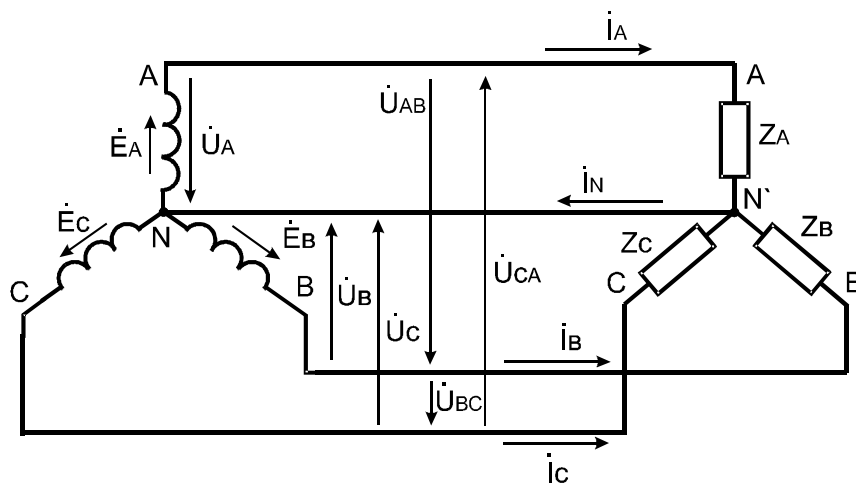


Рис. 6.2. Трехфазная четырехпроводная система переменного тока

Таким образом, генератор соединен с нагрузкой четырьмя проводами, поэтому такая система называется *трехфазной четырехпроводной*.

Токи, протекающие в фазах генератора или нагрузки, называются *фазными* и обозначаются:  $I_A$ ;  $I_B$ ;  $I_C$  или в общем виде —  $I_\phi$ .

Токи, протекающие по линейным проводам, называются *линейными* и обозначаются  $I_L$ .

При соединении «звездой» фаза генератора, линейный провод и фаза нагрузки соединены последовательно, поэтому  $I_L = I_\phi$ .

По нейтральному проводу протекает ток, равный геометрической сумме трех токов  $\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$  или алгебраической сумме комплексных этих токов  $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$ .

Напряжения, измеренные между началом и концом каждой фазы, называются *фазными* и обозначаются:  $U_A$ ,  $U_B$ ,  $U_C$  или в общем виде —  $U_\phi$ .

Напряжения  $U_{AB}$ ,  $U_{BC}$ ,  $U_{CA}$  называются *линейными* и измеряются между линейными проводами, т.е. между началами фаз. В линейных проводах принято считать положительными направления токов от генератора к нагрузке, а в нейтральном — от нагрузки к генератору.

*Благодаря наличию нейтрального провода фазные напряжения потребителя остаются неизменными при любой нагрузке.*

Если ток в нейтральном проводе равен нулю, что может иметь место при симметричной нагрузке, то трехфазная система становится *трехпроводной* (рис. 6.3).

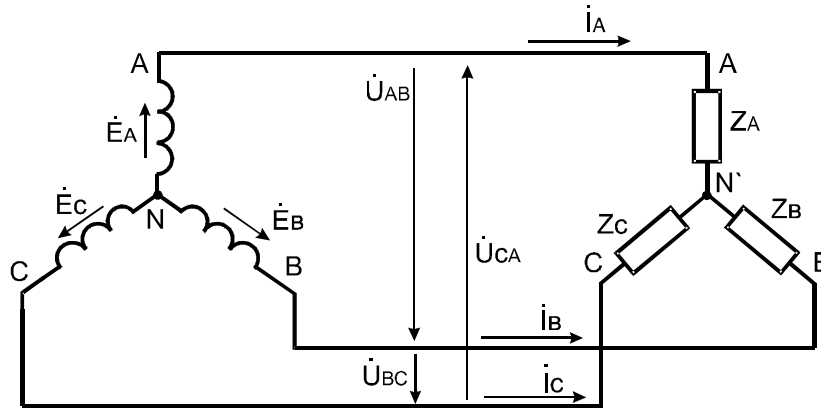


Рис. 6.3. Трехфазная трехпроводная система переменного тока

Соотношения между линейными и фазными напряжениями определяются по формулам

$$\bar{U}_{AB} = \bar{U}_A - \bar{U}_B; \quad \bar{U}_{BC} = \bar{U}_B - \bar{U}_C; \quad \bar{U}_{CA} = \bar{U}_C - \bar{U}_A$$

или

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B; \quad \dot{U}_{BC} = \dot{U}_B - \dot{U}_C; \quad \dot{U}_{CA} = \dot{U}_C - \dot{U}_A.$$

Векторная диаграмма, построенная по этим уравнениям, изображена на рисунке 6.4.

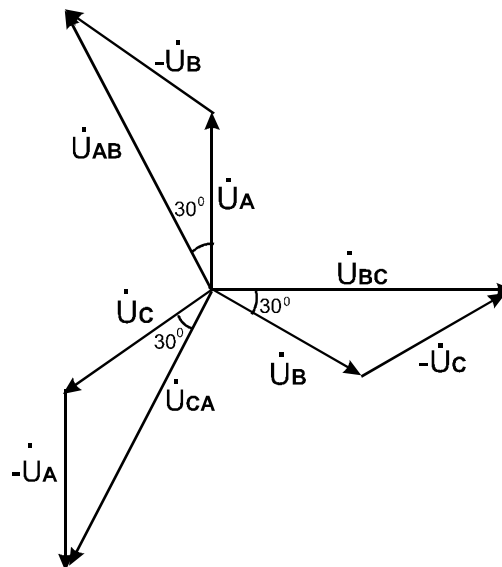


Рис. 6.4. Векторная диаграмма фазных и линейных напряжений

Из векторной диаграммы видно, что «звезда» фазных напряжений отстает от «звезды» линейных напряжений на угол  $30^\circ$ . Соотношение между величинами фазных и линейных напряжений для симметричной нагрузки можно вывести, рассматривая один из треугольников, составленных векторами фазных и линейных напряжений.

Например: 
$$\frac{U_{BC}}{2} = U_B \cos 30^\circ = U_B \frac{\sqrt{3}}{2},$$

откуда

$$U_{BC} = U_B \sqrt{3} \quad \text{или} \quad U_{\text{л}} = U_{\phi} \sqrt{3}.$$

То есть *линейное напряжение в случае симметричной нагрузки и при наличии нейтрального провода в  $\sqrt{3}$  раз больше фазного.*

Нагрузка, подключенная к трехфазному генератору, может быть симметричной и несимметричной.

*Симметричной* называется такая нагрузка, при которой сопротивления фаз одинаковы по величине и по характеру, т.е.

$$Z_A = Z_B = Z_C = r + jx.$$

При симметричной нагрузке токи в фазах равны между собой:

$$I_A = I_B = I_C,$$

где 
$$I_A = \frac{U_A}{Z_A}; \quad I_B = \frac{U_B}{Z_B}; \quad I_C = \frac{U_C}{Z_C}.$$

На рисунке 6.5 показаны векторные диаграммы напряжений и токов для симметричной активной нагрузки при наличии нейтрального провода  $\bar{I}_N = \bar{I}_A + \bar{I}_B + \bar{I}_C$  и без него.

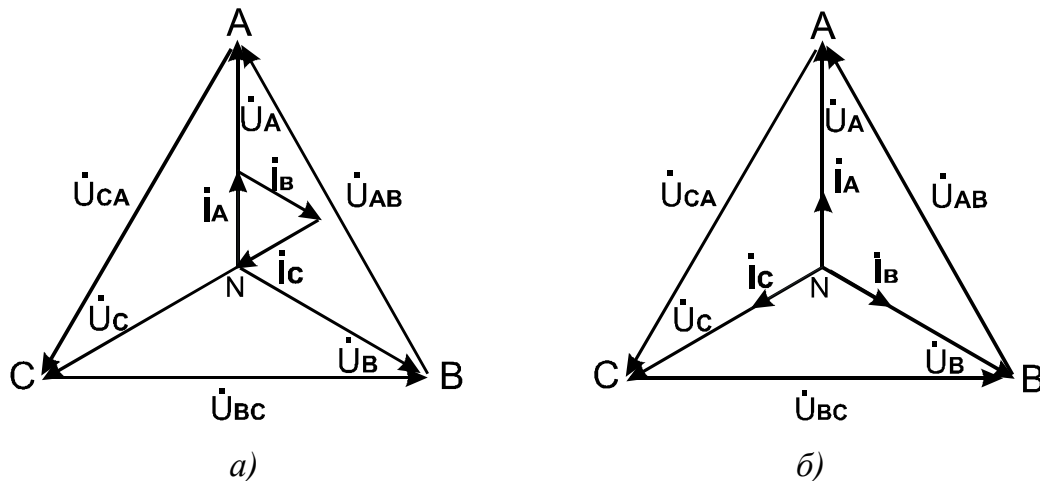


Рис. 6.5. Векторные диаграммы напряжений и токов для симметричной нагрузки:  
а — при наличии нейтрального провода;  
б — без нейтрального провода

При *несимметричной* нагрузке сопротивления фаз

$$Z_A \neq Z_B \neq Z_C,$$

а токи в фазах

$$I_A \neq I_B \neq I_C.$$

Векторные диаграммы для данного случая изображены на рисунке 6.6.

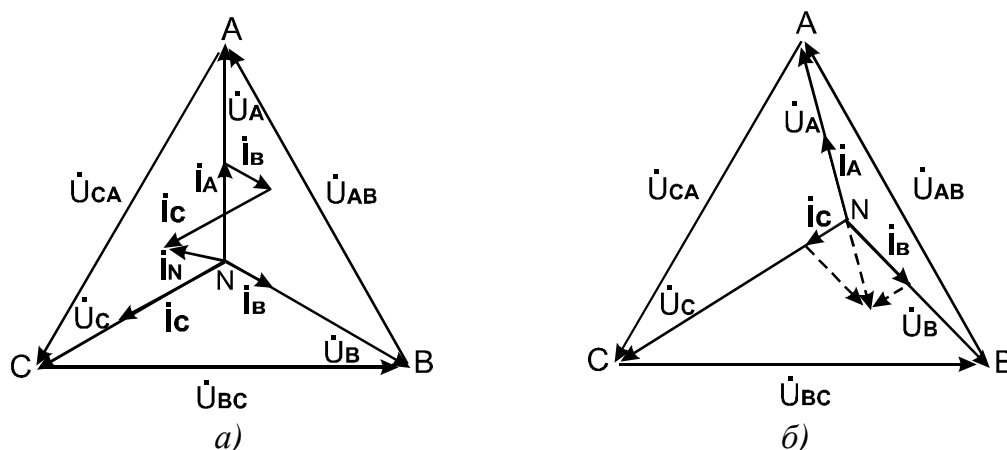


Рис. 6.6. Векторные диаграммы напряжений и токов:  
*а* — при наличии нейтрального провода;  
*б* — без нейтрального провода

На рисунке 6.6, *а* показано графическое определение тока в нейтральном проводе  $I_N$ . Благодаря наличию нейтрального провода при несимметричной нагрузке напряжения на фазах потребителя электроэнергии остаются неизменными и равными фазным напряжениям генератора (если пренебречь сопротивлением нейтрального провода и линейных проводов).

В случае отсутствия или обрыва нейтрального провода нулевая точка смещается в сторону более нагруженной фазы, и напряжения на фазах потребителя изменяются, что приводит к нарушению нормальной работы приемников электроэнергии (рис. 6.6, *б*). Поэтому четырехпроводной сети в нейтральный провод запрещается ставить предохранитель или коммутационный аппарат. Токи в трехфазной цепи без нейтрального провода принимают такие значения, при которых их геометрическая сумма равна нулю.

Если в качестве нагрузки трехфазной трехпроводной цепи используются лампы накаливания одинаковой мощности, то их накал определяется фазным напряжением. А так как напряжения на фазах различны, то лампы будут гореть с различной яркостью. Наибольший накал ламп будет в той фазе, в которой включено меньшее количество ламп.

В случае обрыва одной из фаз (рис. 6.7, *а*), например фазы *A* без нейтрального провода (отключены все лампы в этой фазе), две другие фазы *B* и *C* оказываются включенными последовательно и находятся под линейным напряжением  $U_{BC}$ . Если сопротивления одинаковы, то напряжения их будут равны, и каждое составляет половину линейного напряжения:  $U_{BC}/2$  (рис. 6.7, *б*).

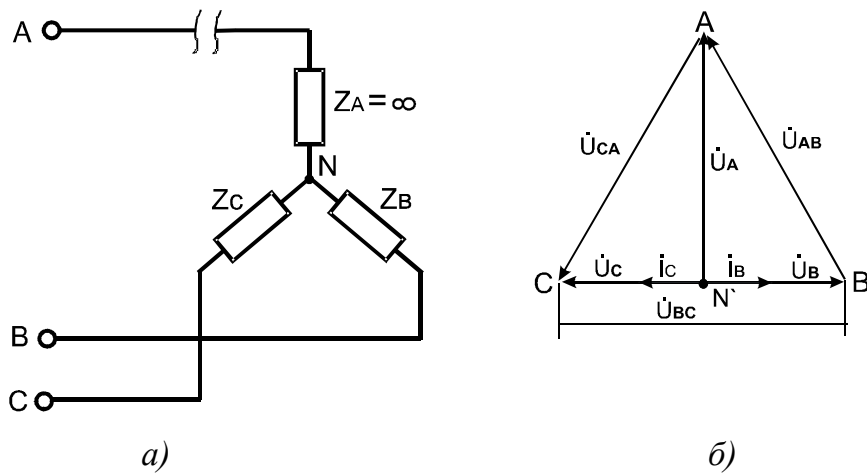


Рис. 6.7. Обрыв фазного провода (а) и векторная диаграмма (б) для этого случая

В этом случае лампы, включенные в фазу  $A$ , погаснут, а в фазах  $B$  и  $C$  будут иметь меньший накал.

Уменьшение сопротивления одной из фаз (например, фазы  $A$ ) до нуля, что соответствует короткому замыканию в ней (рис. 6.8, а), приводит к смещению нулевой точки в вершину треугольника линейных напряжений, тогда  $U_A = 0$ , а фазные напряжения  $U_B$  и  $U_C$  становятся равными линейным:  $U_{AB}$  и  $U_{CA}$  (рис. 6.8, б). Ток в фазе  $A$  в три раза больше тока в рабочем режиме.

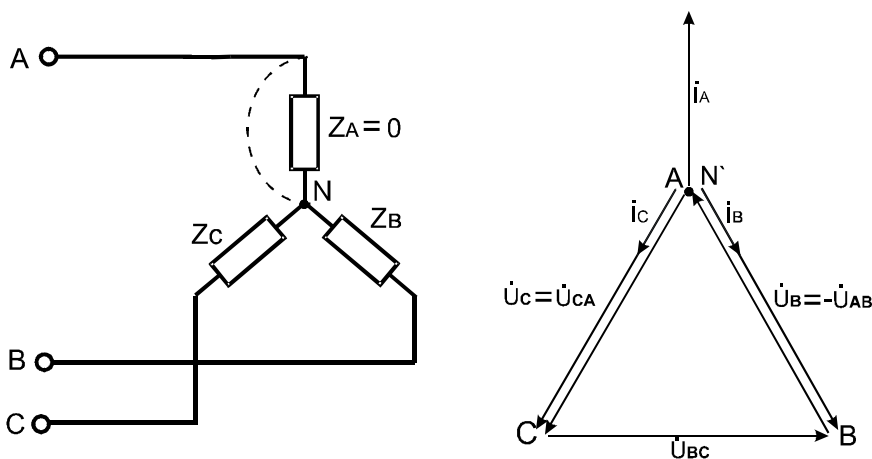


Рис. 6.8. Короткое замыкание фазы без нейтрального провода и векторная диаграмма для этого случая

Лампы, включенные в фазу  $A$ , гаснут, а в фазах  $B$  и  $C$  светятся ярче обычного, что, в конечном итоге, приведет к их быстрому перегоранию.

Отсюда следует вывод, что при несимметричной нагрузке фаз нельзя применять соединение приемников по схеме «звезда» без нулевого провода.

## Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь согласно рисунку 6.9.

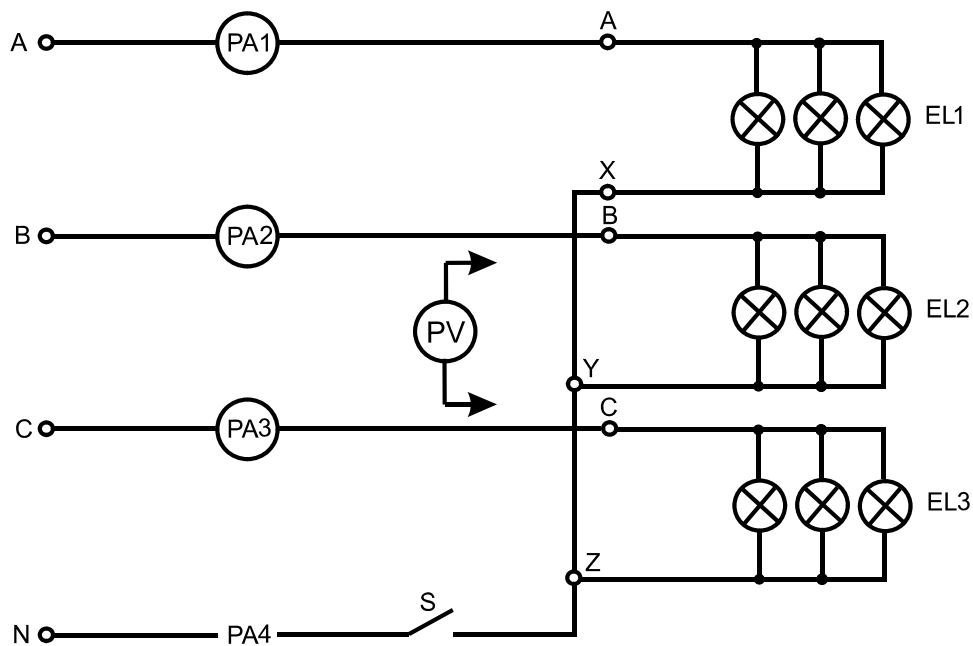


Рис. 6.9. Принципиальная электрическая схема исследования трехфазной цепи при соединении потребителей по схеме «звезда»

2. Установить симметричную нагрузку в фазах (одинаковое количество ламп в каждой фазе) и записать показания приборов при наличии нейтрального провода и без него (включение и отключение нейтрального провода производить тумблером  $S$ ).

Убедиться, что  $U_{л} = \sqrt{3} U_{\phi}$ .

3. Установить несимметричную нагрузку фаз (разное количество ламп в каждой фазе) и записать показания приборов при наличии нейтрального провода и без него.

4. Установить симметричную нагрузку и, отключив все лампы в одной из фаз потребителя, что соответствует обрыву в данной фазе, записать показания приборов при наличии нейтрального провода и без него.

5. Провести опыт короткого замыкания фазы без нейтрального провода. Для этого накоротко замкнуть начало и конец любой фазы, например  $A$  и  $X$  (в реальной энергосистеме такого делать нельзя, необходимо использовать сопротивление, ограничивающее ток короткого замыкания). Нагрузка двух других фаз при этом должна быть симметричной; нейтральный провод отключен.

Записать показания приборов. Все данные измерений и вычислений внести в таблицу 6.1.

6. Построить векторные диаграммы для каждого пункта.

Таблица 6.1. Результаты исследования электрической цепи с соединением потребителей по схеме «звезда»

Характер нагрузки	$U_A$ В	$U_B$ В	$U_C$ В	$U_{AB}$ В	$U_{BC}$ В	$U_{CA}$ В	$U_{NN}$ В	$I_A$ А	$I_B$ А	$I_C$ А	$I_N$ А
Симметричная без нейтрального провода											
Симметричная с нейтральным проводом											
Несимметричная без нейтрального провода											
Несимметричная с нейтральным проводом											
Полная разгрузка одной фазы без нейтрального провода											
Полная разгрузка одной фазы с нейтральным проводом											
Короткое замыкание фазы без нейтрального провода											

Примечание.  $U_{NN}$  — напряжение, измеряемое между нейтральными точками генератора и нагрузки.

### Контрольные вопросы

1. Какое соединение фаз генератора и нагрузки называется «звездой»?
2. Каково соотношение между фазными и линейными напряжениями и токами при соединении нагрузки по схеме «звезда»?
3. Объясните назначение нулевого провода.
4. Как определить ток в нулевом проводе?

5. Что такое напряжение смещения нейтрали? В каких случаях оно равно нулю?
6. Чем опасно короткое замыкание одной фазы при наличии и отсутствии нулевого провода?
7. Какая трехфазная система называется несвязанной?
8. С какой целью нейтраль трансформатора или генератора подключается к заземляющему устройству?
9. Что такое защитное зануление в электроустановках напряжением до 1 кВ?
10. Поясните построенные векторные диаграммы.
11. Как производится измерение мощности в трехфазных цепях при соединении потребителей по схеме «звезда»?
12. Назовите преимущества трехфазных систем.

#### *Список рекомендуемых источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 109.
2. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. — С. 87-92.
3. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 85-90, 96.
4. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — М. : Юрайт, 2013. — С. 301-311, 316.



## Лабораторная работа 7

### Исследование цепи трехфазного тока при соединении потребителей по схеме «треугольник»

*Цель работы:* исследование различных режимов работы потребителей трехфазного тока, соединенных по схеме «треугольник».

#### *Основные теоретические сведения*

Трехфазной системой переменных токов называется совокупность трех однофазных электрических цепей, в которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой частоты, сдвинутые по фазе на  $1/3$  периода и создаваемые общим источником электрической энергии.

Разработка многофазных систем была обусловлена исторически. Исследования в данной области были вызваны требованиями развивающегося производства, а успехам в развитии многофазных систем способствовали открытия в физике электрических и магнитных явлений.

Важнейшей предпосылкой разработки многофазных электрических систем явилось открытие явления вращающегося магнитного поля (1888 г.). Первые электрические двигатели были двухфазными, но они имели невысокие рабочие характеристики. Наиболее рациональной и перспективной оказалась трехфазная система. Большой вклад в разработку трехфазных систем внес выдающийся русский ученый-электротехник М.О. Доливо-Добровольский, создавший трехфазные асинхронные двигатели, трансформаторы, предложивший трех- и четырехпроводные цепи, в связи с чем по праву считающийся основоположником трехфазных систем.

Трехфазный генератор имеет три выходные обмотки, одинаковые по числу витков, но вырабатывающие ЭДС, сдвинутые по фазе на  $120^\circ$ . Можно было бы использовать систему, в которой фазы обмотки генератора не были бы гальванически соединены друг с другом. Это так называемая *несвязная система* (рис. 7.1). В этом случае каждую фазу генератора необходимо соединять с приемником двумя проводами, т.е. будет иметь место шестипроводная линия.

По закону Ома ток, протекающий в фазе  $A$ , определяется по формуле

$$I_\phi = \frac{U_\phi}{Z_\phi},$$

где  $U_\phi$  — напряжение на зажимах фазы, В;  
 $Z_\phi$  — полное сопротивление фазы, Ом.

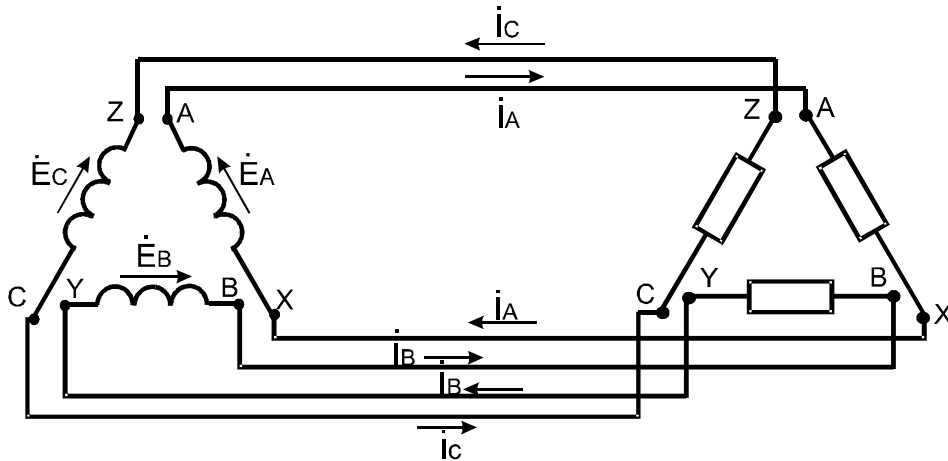


Рис. 7.1. Несвязанная трехфазная система

Несвязанные системы неэкономичны и практического применения не имеют.

Объединяя попарно провода несвязанной шестипроводной системы и соединяя фазы генератора и нагрузки, можно перейти к трехпроводной трехфазной системе, соединенной по схеме «треугольник» (рис. 7.2).

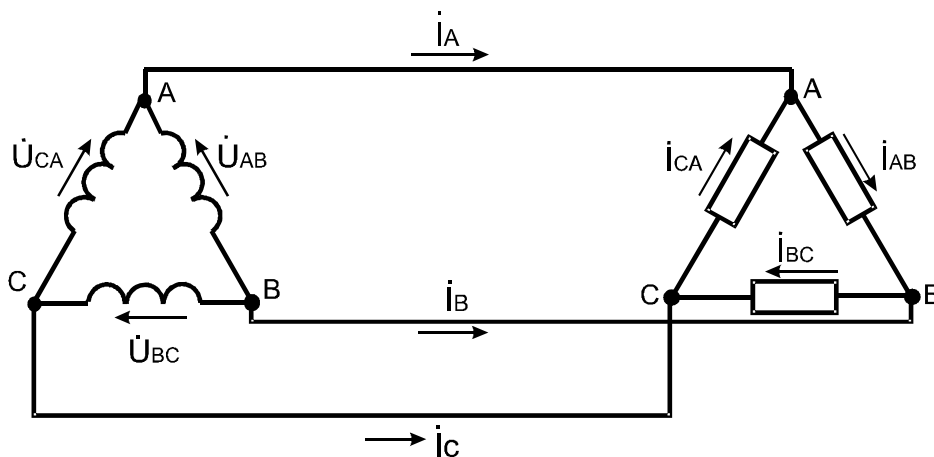


Рис. 7.2. Трехфазная трехпроводная система, соединенная по схеме «треугольник»

Как видно, соединение по схеме «треугольник» выполняется так, чтобы конец фазы  $AB$  был соединен с началом фазы  $BC$ , конец фазы  $BC$  соединен с началом фазы  $CA$ , конец фазы  $CA$  соединен с началом фазы  $AB$ . К общим точкам соединения начал и концов фаз подводятся линейные провода, соединяющие генератор с нагрузкой. При соединении нагрузки по схеме «треугольник» линейное напряжение равно фазному:

$$U_{л} = U_{\phi}.$$

Соотношения между фазными и линейными токами устанавливаются на основании первого закона Кирхгофа из уравнений, составленных для узловых точек  $A, B, C$  нагрузки:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}.$$

Таким образом, линейные токи равны алгебраической сумме векторов фазных токов. При симметричной нагрузке фазные токи одинаковы и сдвинуты по фазе на  $120^\circ$ . Векторная диаграмма для данного случая изображена на рисунке 7.3.

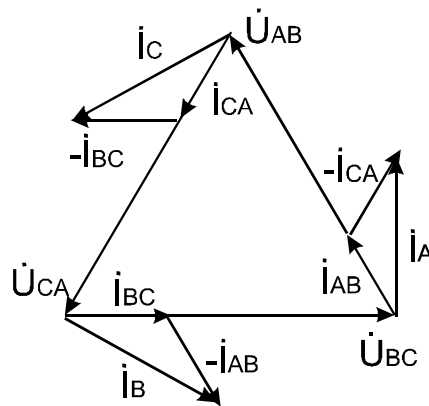


Рис. 7.3. Векторная диаграмма для симметричной нагрузки

Рассмотрим *несимметричную нагрузку* фаз. Если в одну из фаз включить дополнительное сопротивление параллельно имеющемуся, то есть увеличить количество ламп, то общее сопротивление этой фазы уменьшится, а ток возрастет. Величины же токов в двух других фазах остаются неизменными, так как их сопротивления и напряжения не изменились. Векторная диаграмма, представленная на рисунке 7.4, построена для случая увеличения нагрузки в фазе  $AB$ .

При увеличении сопротивления одной из фаз (например, фазы  $BC$ ) до бесконечности, что соответствует *обрыву данной фазы*, ток в ней равен нулю, в двух других фазах токи не изменятся, так как сопротивления в них остались такими же, как и при симметричной нагрузке. Лампы, включенные в фазу  $BC$ , не горят. В двух других фазах накал ламп такой же, каким был при симметричной нагрузке.

Векторная диаграмма для данного случая изображена на рисунке 7.5.

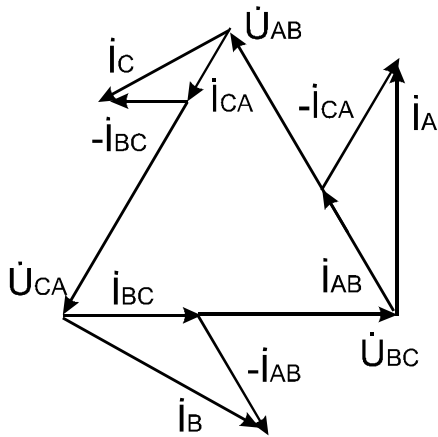


Рис. 7.4. Векторная диаграмма для несимметричной нагрузки

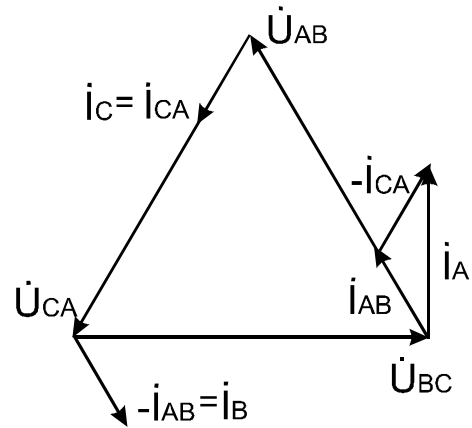


Рис. 7.5. Векторная диаграмма для обрыва фазы

В случае обрыва одного из линейных проводов (например, провода, по которому протекает ток  $I_A$ ) цепь трехфазного тока (рис. 7.6) можно представить в виде однофазной, с двумя параллельно включенными ветвями (рис. 7.7).

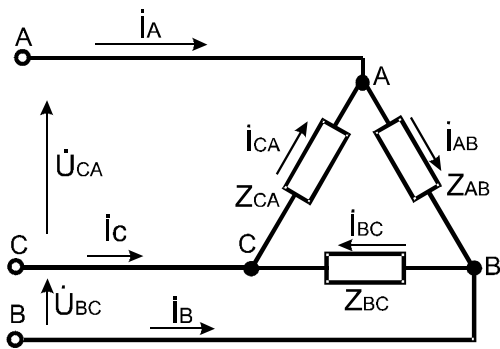


Рис. 7.6. Цепь трехфазного тока

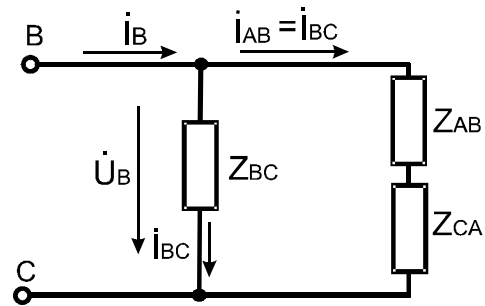


Рис. 7.7. Электрическая цепь при обрыве линейного провода

В этом случае лампы в фазе  $BC$  остались под фазным напряжением, а фазы  $AB$  и  $CA$  — соединенными последовательно под напряжением фазы  $U_{BC}$ .

Векторная диаграмма для данного случая имеет вид, представленный на рисунке 7.8.

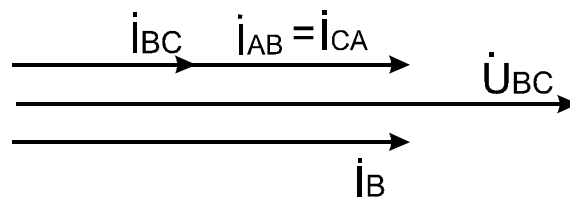


Рис. 7.8. Векторная диаграмма для случая обрыва линейного провода

Следовательно, напряжение  $U_{BC}$  делится поровну между фазами  $AB$  и  $CA$ . Активная мощность трехфазного тока при несимметричной нагрузке фаз равна сумме активных мощностей отдельных фаз:

$$P = P_{AB} + P_{BC} + P_{CA},$$

где  $P_{AB} = U_{AB} I_{AB} \cos \varphi_{AB}$ ;

$$P_{BC} = U_{BC} I_{BC} \cos \varphi_{BC};$$

$$P_{CA} = U_{CA} I_{CA} \cos \varphi_{CA}.$$

При симметричной нагрузке фаз

$$P = 3P_{\phi} = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi.$$

А так как при соединении нагрузки треугольником

$$U_{\phi} = U_{л}; \quad I_{\phi} = \frac{I_{л}}{\sqrt{3}},$$

то  $P = 3U_{\phi} I_{\phi} \cos \varphi = 3U_{л} \frac{I_{л}}{\sqrt{3}} \cos \varphi_{\phi},$

т.е.  $P = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \cos \varphi_{\phi}.$

Соответственно реактивная мощность  $Q = \sqrt{3} U_{л} I_{л} \sin \varphi_{\phi}.$

Полная мощность  $S = \sqrt{3} U_{л} I_{л}.$

### Порядок выполнения работы

1. Собрать электрическую схему согласно рисунку 7.9.

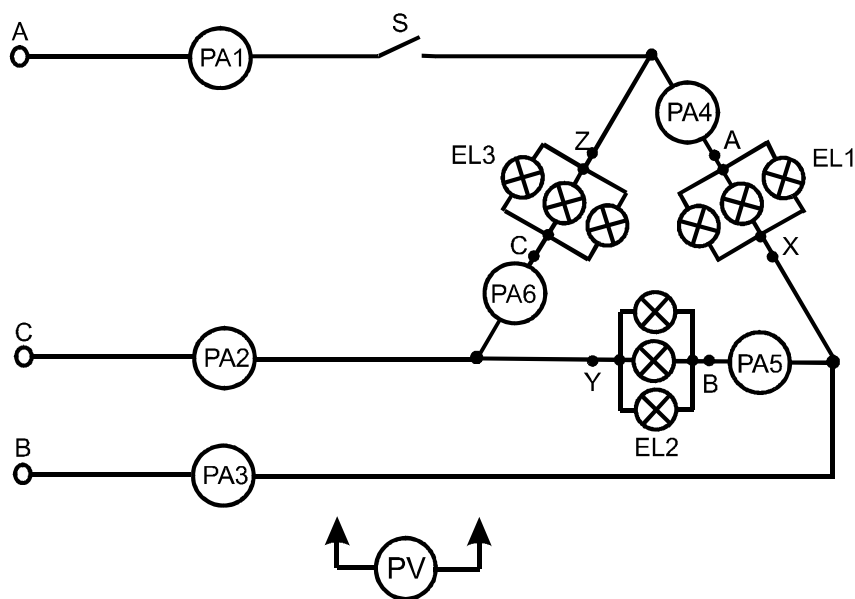


Рис. 7.9. Схема исследования трехфазной цепи при соединении треугольником

2. Измерить фазные, линейные токи и напряжения при симметричной нагрузке фаз. Убедиться, что  $I_L = \sqrt{3} I_\phi$ . Данные измерений занести в таблицу 7.1.

3. Произвести аналогичные измерения для несимметричной нагрузки (включить разное количество ламп в фазах). Данные измерений занести в таблицу 7.1.

*Таблица 7.1. Результаты исследования электрической цепи при соединении потребителей по схеме «треугольник»*

Характер нагрузки	$I_{AB},$ А	$I_{BC},$ А	$I_{CA},$ А	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В
Симметричная									
Несимметричная									
Обрыв фазы									
Обрыв линейного провода									

4. Установив симметричную нагрузку, отключить полностью лампы в одной из фаз (обрыв фазы). Данные измерений занести в таблицу 7.1.

5. При симметричной нагрузке фаз осуществить обрыв одного из линейных проводов (разомкнуть выключатель S). Данные измерений занести в таблицу 7.1.

6. Для всех пунктов эксперимента построить в масштабе векторные диаграммы.

### *Содержание отчета*

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки.
3. Таблица с результатами измерений.
4. Расчетные формулы и векторные диаграммы.
5. Выводы по работе.

### *Контрольные вопросы*

1. Какое соединение фаз генератора или нагрузки называется «треугольником»?
2. Каковы соотношения между линейными и фазными напряжениями и токами при симметричной нагрузке фаз, соединенных по схеме «треугольник»?
3. Как определяются линейные токи?

4. Как определяются активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи при различных нагрузках?
5. Каковы будут напряжения на фазах приемников электроэнергии, если перегорит плавкая вставка предохранителя в одном из линейных проводов?
6. Как производится измерение мощности в трехфазных цепях при соединении нагрузки по схеме «треугольник»?

*Список рекомендуемых источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 112.
2. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. — С. 87-88, 93-95.
3. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 85-87, 91-96.
4. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — М. : Юрайт, 2013. — С. 311-316.

## Лабораторная работа 8

### Исследование однофазного индукционного счетчика электрической энергии

*Цель работы:* изучение устройства, принципа работы однофазного индукционного счетчика электрической энергии, включение его в сеть и осуществление поверки.

#### *Основные теоретические сведения*

Электрическая энергия  $W$  равна произведению мощности электрической цепи на время:

$$W = Pt,$$

где  $P$  — мощность, Вт;

$t$  — время, с.

Единица измерения электрической энергии — Вт·с.

На практике применяют более крупную единицу — кВт·ч:

$$1 \text{ кВт}\cdot\text{ч} = 1\,000 \cdot 3\,600 = 3\,600\,000 \text{ Дж (Вт}\cdot\text{с)}.$$

Счетчики электроэнергии можно классифицировать по *типу измеряемых величин, типу подключения и по типу конструкции*.

По типу подключения все счетчики разделяют на приборы *прямого включения* в силовую цепь и приборы *трансформаторного включения*, подключаемые к силовой цепи через специальные измерительные трансформаторы.

По измеряемым величинам электросчетчики разделяют на *однофазные* (измерение переменного тока 220 В, 50 Гц) и *трехфазные* (380 В, 50 Гц). Все современные электронные трехфазные счетчики поддерживают однофазный учет.

Также существуют трехфазные счетчики для измерения тока напряжением в 100 В, которые применяются только с трансформаторами тока в высоковольтных (напряжением выше 660 В) цепях.

По конструкции: *индукционным* (электромеханическим электросчетчиком) называется электросчетчик, в котором магнитное поле неподвижных токопроводящих катушек влияет на подвижный элемент из проводящего материала. Подвижный элемент представляет собой диск, по которому протекают токи, индуцированные магнитным полем катушек. Количество оборотов диска в этом случае прямо пропорционально потребленной электроэнергии.



Индукционные счетчики электроэнергии постоянно вытесняются с рынка электронными счетчиками из-за отдельных недостатков: отсутствие дистанционного автоматического снятия показаний, однотарифность, погрешности учета, плохая защита от краж электроэнергии, а также низкой функциональности, неудобства в установке и эксплуатации по сравнению с современными электронными приборами. Индукционные счетчики хорошо подходят для квартир с низким энергопотреблением.

*Электронным* (статическим электросчетчиком) называется электросчетчик, в котором переменный ток и напряжение воздействуют на твердотельные (электронные) элементы для создания на выходе импульсов, число которых пропорционально измеряемой активной энергии. То есть измерения активной энергии такими электросчетчиками основаны на преобразовании аналоговых входных сигналов тока и напряжения в счетный импульс. Измерительный элемент электронного электросчетчика служит для создания на выходе импульсов, число которых пропорционально измеряемой активной энергии. Счетный механизм представляет собой электромеханическое (имеет преимущество в областях с холодным климатом, при условии установки прибора на улице) или электронное устройство, содержащее как запоминающее устройство, так и дисплей. Электронные счетчики хорошо подходят для квартир с высоким энергопотреблением и для предприятий.

Основными достоинствами электронных электросчетчиков является возможность учета электроэнергии по дифференцированным тарифам (одно-, двух- и более тарифный), то есть возможность запоминать и показывать количество использованной электроэнергии в зависимости от запрограммированных периодов времени, многотарифный учет достигается за счет набора счетных механизмов, каждый из которых работает в установленные интервалы времени, соответствующие различным тарифам. Электронные электросчетчики имеют большой межповерочный период (4-16 лет).

*Гибридные* счетчики электроэнергии — редко используемый промежуточный вариант с цифровым интерфейсом, измерительной частью индукционного или электронного типа, механическим вычислительным устройством.

Для учета электрической энергии в цепях однофазного тока используются электрические счетчики индукционной системы типа СО.

*Счетчик измеряет энергию, израсходованную потребителем за определенный промежуток времени:*

$$W = \int_{t_1}^{t_2} u i dt = \int_{t_1}^{t_2} p dt,$$

где  $u$  — мгновенное значение напряжения питания приемников энергии, В;

$i$  — мгновенное значение тока, протекающего в цепи потребителя, А;

$p$  — мгновенное значение мощности потребителя, Вт;

$t$  — время, с.

Следовательно, электрический счетчик — это *суммирующий прибор*. Все электрические счетчики по роду измерений величины подразделяются на две группы:

СА — счетчики активной энергии;

СР — счетчики реактивной энергии.

Для учета энергии трехфазных потребителей в четырехпроводной сети применяют трех- и четырехэлементные счетчики активной энергии (СА-3, СА-4) и реактивной энергии (СР-3, СР-4).

В данной работе исследуется индукционный однофазный счетчик электрической энергии типа СО-2.

### *Устройство счетчика*

На стальных сердечниках 1 и 2 (рис. 8.1), набранных из тонких пластин электротехнической стали, установлены две обмотки (катушки) — токовая обмотка 3 и обмотка напряжения 4.

*Токовая обмотка* выполнена незначительным числом витков медного провода относительно большого сечения, соответствующего номинальному току счетчика. Она включается в сеть *последовательно* с нагрузкой.

*Обмотка напряжения* имеет 8-12 тыс. витков тонкой проволоки диаметром 0,8 или 0,12 мм и включается в сеть *параллельно* нагрузке.

Между сердечниками установлен алюминиевый диск 5, который укреплен на оси 7 и свободно вращается в подпятниках.

Постоянный магнит 8 необходим для создания тормозного момента. На оси также расположена червячная передача 10, которая приводит в движение счетный механизм 9. Все элементы счетчика укреплены на пластмассовом основании и закрываются крышкой. В нижней части основания укреплены *клеммы* для включения счетчика в сеть.

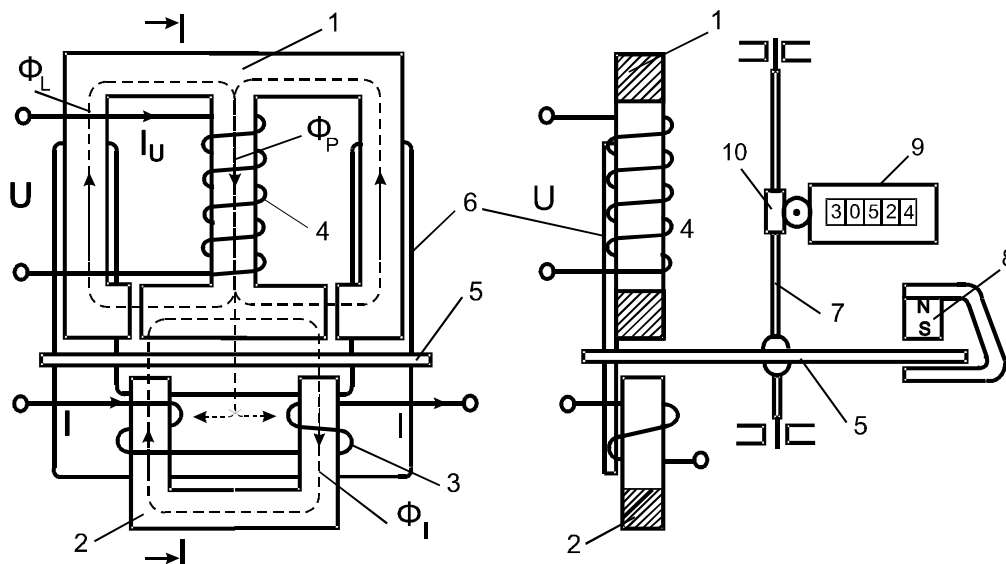


Рис. 8.1. Устройство однофазного индукционного счетчика электрической энергии

На лицевой стороне счетчика под стеклом установлен *паспорт*, в котором указываются основные данные счетчика, например:

- тип — СО-2;
- класс точности — 2,5;
- передаточное число К (например, 1 200);
- номинальное напряжение — 220 В;
- номинальный ток — 5А;
- частота тока — 50 Гц;
- стандарт, по которому изготовлен счетчик;
- заводской номер;
- год выпуска.

### Принцип работы счетчика

При включении катушки напряжения в сеть по ней течет ток, величина которого определяется по формуле

$$I = \frac{U}{Z},$$

где  $U$  — напряжение сети, В;

$Z$  — полное сопротивление обмотки, Ом.

Ток вызывает в сердечнике  $I$  магнитный поток  $\Phi$ , разделенный на две части:  $\Phi_P$  и  $\Phi_L$ , где  $\Phi_P$  — рабочий поток, который пронизывает алюминиевый диск и замыкается через противоположную скобу  $b$ ;  $\Phi_L$  — магнитный поток, замыкающийся через боковые стержни сердечника  $1$  и непосредственного участия в создании вращающего момента счетчика не принимающий.

При включении потребителей по токовой катушке течет ток  $I$ . Этот ток создает магнитный поток  $\Phi_I$ , который пересекает диск в двух местах. Это обеспечивается U-образной формой магнитопровода токовой катушки.

Магнитные потоки  $\Phi_P$  и  $\Phi_I$ , пронизывая диск, индуцируют в нем вихревые токи.

Взаимодействие переменных магнитных потоков  $\Phi_P$  и  $\Phi_I$  с индуцированными ими токами создает вращающий момент, действующий на диск 5. Величина этого вращающего момента определяется величиной напряжения, под которым находится катушка 4, величиной тока нагрузки  $I$ , протекающего по катушке, и коэффициентом мощности  $\cos \varphi$  цепи, в которую включен счетчик, т.е.

$$M_{BP} = kUI \cos \varphi,$$

где  $k$  — коэффициент пропорциональности.

Таким образом, вращающий момент, действующий на диск счетчика, пропорционален активной мощности цепи, в которую он включен. Под действием этого вращающего момента диск вращается. Установившаяся скорость вращения диска наступает при равенстве вращающего и тормозного моментов:

$$M_{BP} = M_T.$$

Тормозной момент создается постоянным магнитом 8. Скорость вращения диска пропорциональна мощности потребителя. С осью диска связан вал счетного механизма. Число оборотов вала счетного механизма зависит от мощности, времени и передаточного числа счетного механизма  $K$ .

*Передаточное число счетчика* — это число оборотов его диска, приходящегося на 1 кВт·ч:

$$K = \frac{N}{W} = \frac{N}{Pt}.$$

Энергия  $W_t$ , Вт·с (кВт·ч), потребленная из сети за время  $t$ , в течение которого диск сделал  $N_t$  оборотов, будет равна:

$$W_t = Pt = \frac{1}{K} N_t,$$

где  $P$  — мощность потребителя, Вт (кВт);

$t$  — время, за которое диск сделал  $n$  оборотов, с;

$N_t$  — число оборотов диска за время  $t$ .

### Методика поверки счетчика

Счетчик будет точно учитывать энергию при соблюдении многих условий, которые строго выполнить практически невозможно.

Для данного счетчика допускаются следующие погрешности в зависимости от величины тока при  $\cos \varphi = 1$ :

$$\begin{array}{ll} 0,1I_H & \text{— } \pm 3,5\%; \\ 0,2I_H & \text{— } \pm 2,5\%; \\ 0,5I_H & \text{— } \pm 2,5\%; \\ 1,5I_H & \text{— } \pm 2,5\%. \end{array}$$

Для поверки счетчика необходимо:

1. Определить номинальную постоянную счетчика:

$$C_H = \frac{1 \text{ кВт}\cdot\text{ч}}{K} = \frac{1\,000 \cdot 3\,600}{K}.$$

Величину  $K$  берут из паспортных данных счетчика.

*Номинальная постоянная счетчика* — это величина, обратная передаточному числу. Она определяет количество энергии в Вт·с, приходящееся на один оборот диска.

2. Определить действительную постоянную счетчика:

$$C_D = \frac{U I t}{n},$$

где  $U$  — напряжение сети, В;

$I$  — ток потребителя, А;

$t$  — время, за которое диск сделает  $n$  оборотов;

$n$  — количество оборотов диска (принять равным 10).

3. Определить относительную погрешность счетчика:

$$\delta = \frac{C_H - C_D}{C_H} 100\%.$$

Если действительная постоянная больше номинальной, счетчик дает заниженные показания — недоучитывает энергию; если действительная постоянная меньше номинальной — счетчик дает завышенные показания.

Согласно ГОСТ 6570—70, счетчики электрической энергии выпускаются трех классов точности: 1; 2; 2,5. Цифра, обозначающая класс точности, указывает значение допустимой относительной погрешности счетчика при его номинальной нагрузке.

4. Определить чувствительность счетчика:

$$S = \frac{I_{\min}}{I_H} 100\%,$$

где  $I_{\min}$  — минимальный ток, при котором диск начинает устойчиво вращаться.

По ГОСТ 6570—60 чувствительность не должна быть меньше 0,5-1,0% в зависимости от класса точности.

В данной работе чувствительность не определяется.

### Порядок выполнения работы

1. Изучить конструкцию счетчика, принцип его работы.
2. Собрать схему согласно рисунку 8.2.

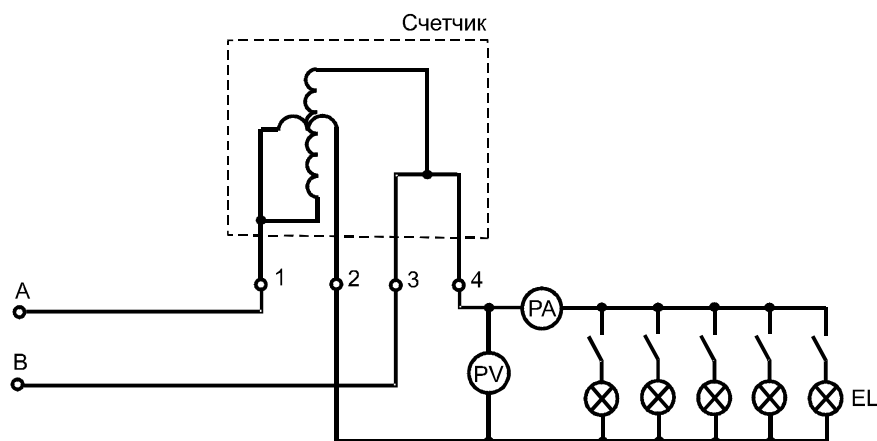


Рис. 8.2. Принципиальная электрическая схема лабораторной установки

3. Устанавливая различную ламповую нагрузку, для каждого значения тока определить по секундомеру время, за которое диск делает 10 оборотов. Все полученные данные напряжения, тока и времени занести в таблицу 8.1.

Таблица 8.1. Результаты исследования однофазного счетчика электрической энергии

№ п/п	Измерено				Вычислено		
	$U, В$	$I, А$	$t, с$	$n, об$	$C_H, Вт·с/об$	$C_d, Вт·с/об$	$\delta, \%$
1							
2							
3							
4							

4. Вычислить номинальную и действительную постоянные, относительную погрешность для всех режимов нагрузки счетчика.
5. Сделать выводы о пригодности данного счетчика.

### *Содержание отчета*

1. Наименование и цель работы.
2. Схема включения однофазного индукционного счетчика в сеть.
3. Таблица с результатами измеренных и вычисленных значений.
4. Выводы о результатах поверки счетчика.

### *Контрольные вопросы*

1. Единицы измерения электрической энергии.
2. Основные части счетчика и их назначение.
3. Принцип работы индукционного счетчика.
4. Что указывается в паспорте счетчика?
5. Что называется передаточным числом счетчика?
6. Что показывает класс точности счетчика?
7. Что называется номинальной постоянной счетчика? Как она определяется?
8. Что называется действительной постоянной счетчика?
9. Как определить погрешность счетчика?
10. Как соотносятся по фазе магнитные потоки обмотки напряжения и обмотки тока счетчика?
11. Чему пропорционален тормозной момент счетчика?
12. По каким параметрам можно классифицировать счетчики электроэнергии?
13. Назовите достоинства и недостатки индукционных счетчиков.
14. Назовите достоинства и недостатки электронных счетчиков.

### *Список рекомендуемых источников*

1. Касаткин А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 277.
2. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — С. 431-435.

## Лабораторная работа 9

### Исследование работы однофазного трансформатора

*Цель работы:* изучение устройства, принципа работы однофазного трансформатора. Исследование трансформатора в режимах холостого хода, короткого замыкания и при нагрузке.

#### *Основные теоретические сведения*

*Трансформатором* называется статический электрический аппарат, предназначенный для преобразования напряжения и тока при неизменной частоте питающей сети.

Процесс преобразования энергии называется *трансформацией*.

Однофазный (двухобмоточный) трансформатор состоит из двух обмоток, помещенных на сердечник, который набирается из тонких листов электротехнической стали, что уменьшает потери энергии от вихревых токов, возникающих в проводниках при изменении пронизывающего их магнитного поля. Листы изолируются друг от друга лаком или оксидной пленкой.

Обмотка, к которой подводится напряжение, называется *первичной*.

Обмотка, к которой подключается нагрузка, называется *вторичной*.

Трансформатор может быть *повышающим* и *понижающим*. По числу фаз различают трансформаторы *однофазные* и *трехфазные*.

Каждый трансформатор имеет бирку, на которой указываются основные *номинальные данные*:

- номинальная мощность  $S_N$ , кВА;
- номинальные напряжения на зажимах первичной и вторичной обмоток  $U_{1N}$  и  $U_{2N}$ ;
- номинальные токи  $I_{1N}$  и  $I_{2N}$ , частота тока  $f$ , напряжение короткого замыкания  $U_K$ .

Номинальными называются такие величины мощности, напряжения и тока, при которых в трансформаторе наступает тепловое равновесие при температуре нагрева обмоток, не вызывающего разрушения изоляции. Так, для современных силовых трансформаторов номинальные мощность и ток принимаются такими, при которых тепловое равновесие наступает при температуре окружающей среды  $35\text{ }^\circ\text{C}$ .

Можно выделить следующие виды трансформаторов.

*Силовой трансформатор.* Силовой трансформатор переменного тока — трансформатор, необходимый для преобразования электрической энергии в электрических сетях и в установках, предназначенных для приема и использования электрической энергии. Слово «силовой» отражает работу данного вида трансформаторов с большими мощностями. Необходимость применения силовых трансформаторов обу-



словлена различной величиной рабочих напряжений ЛЭП (35-750 кВ), городских электросетей (как правило 6, 10 кВ), напряжения, подаваемого конечным потребителям (0,4 кВ, они же 380/220 В) и напряжения, требуемого для работы электромашин и электроприборов (самые различные — от единиц вольт до сотен киловольт).

*Автотрансформатор.* Автотрансформатор — вариант трансформатора, в котором первичная и вторичная обмотки соединены напрямую и имеют за счет этого не только электромагнитную связь, но и электрическую. Обмотка автотрансформатора имеет несколько выводов (как минимум 3), подключаясь к которым, можно получать разные напряжения. Преимуществом автотрансформатора является более высокий КПД, поскольку лишь часть мощности подвергается преобразованию — это особенно существенно, когда входное и выходное напряжения отличаются незначительно.

Недостатком является отсутствие электрической изоляции (гальванической развязки) между первичной и вторичной цепью. Применение автотрансформаторов экономически оправдано вместо обычных трансформаторов для соединения эффективно заземленных сетей с напряжением 110 кВ и выше при коэффициентах трансформации не более 3-4. Существенным достоинством является меньший расход стали для сердечника, меди для обмоток, меньший вес и габариты, и в итоге — меньшая стоимость.

*Трансформатор тока.* Трансформатор тока — трансформатор, питающийся от источника тока. Типичное применение — для снижения первичного тока до величины, используемой в цепях измерения, защиты, управления и сигнализации, кроме того, трансформатор тока осуществляет гальваническую развязку. Номинальное значение тока вторичной обмотки 1 А, 5 А. Первичная обмотка трансформатора тока включается в цепь с измеряемым переменным током, а во вторичную включаются измерительные приборы. Ток, протекающий по вторичной обмотке трансформатора тока, равен току первичной обмотки, деленному на коэффициент трансформации. **ВНИМАНИЕ!** Вторичная обмотка токового трансформатора должна быть надежно замкнута на низкоомную нагрузку измерительного прибора или накоротко. При случайном или умышленном разрыве цепи возникает скачок напряжения, опасный для изоляции, окружающих электроприборов и жизни техперсонала! Поэтому, по правилам технической эксплуатации, необходимо неиспользуемые вторичные обмотки закорачивать, а все вторичные обмотки трансформаторов тока подлежат заземлению.

*Трансформатор напряжения.* Трансформатор напряжения — трансформатор, питающийся от источника напряжения. Типичное применение — преобразование высокого напряжения в низкое в цепях, в измерительных цепях и цепях релейной защиты и автоматики. Применение трансформатора напряжения позволяет изолировать логические цепи защиты и цепи измерения от цепи высокого напряжения.

*Импульсный трансформатор.* Импульсный трансформатор — это трансформатор, предназначенный для преобразования импульсных сигналов с длительностью импульса до десятков микросекунд с минимальным искажением формы импульса. Основное применение заключается в передаче прямоугольного электрического импульса (максимально крутой фронт и срез, относительно постоянная амплитуда). Он служит для трансформации кратковременных видеоимпульсов напряжения. В большинстве случаев основное требование, предъявляемое к импульсным трансформаторам заключается в неискаженной передаче формы трансформируемых импульсов напряжения; при воздействии на вход импульсного трансформатора напряжения той или иной формы на выходе желательно получить импульс напряжения той же самой формы, но, быть может, иной амплитуды или другой полярности.

*Разделительный трансформатор.* Разделительный трансформатор — трансформатор, первичная обмотка которого электрически не связана со вторичными обмотками. Коэффициент трансформации у этого трансформатора равен одному. Силовые разделительные трансформаторы предназначены для повышения безопасности электросетей, при случайных одновременных прикосновениях к земле и токоведущим частям или нетоковедущим частям, которые могут оказаться под напряжением в случае повреждения изоляции.

Существуют и другие виды трансформаторов.

### Опыт холостого хода трансформатора

*Холостой ход трансформатора* — это такой режим его работы, при котором к зажимам первичной обмотки подводится номинальное напряжение, а вторичная обмотка разомкнута.

Из опыта холостого хода можно определить *коэффициент трансформации* как отношение ЭДС первичной обмотки к ЭДС вторичной обмотки:

$$n = \frac{E_1}{E_2} \quad \text{или} \quad n = \frac{W_1}{W_2},$$

где  $W_1$  и  $W_2$  — число витков первичной и вторичной обмоток.

Ток холостого хода трансформатора составляет от 2,5 до 10% от номинального, поэтому падением напряжения на первичной обмотке можно пренебречь и считать приближенно  $U_1 = E_1$ , а  $U_2 = E_2$ .

Тогда коэффициент трансформации — отношение напряжения на зажимах обмоток трансформатора в режиме холостого хода:

$$n = \frac{E_1}{E_2} = \frac{W_1}{W_2} = \frac{U_1}{U_{20}},$$

где  $U_{20}$  — напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе.

Мощность трансформатора в этом режиме затрачивается на возмещение потерь на перемагничивание магнитопровода (гистерезис) и на нагрев магнитопровода вихревыми токами:

$$P_0 = P_{\Gamma} + P_{BT}.$$

Полная мощность  $S = U_1 I_1$ .

Коэффициент мощности при холостом ходе:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_{10}}.$$

Таким образом, опыт холостого хода дает возможность определить коэффициент трансформации  $n$ , потери в стали сердечника и угол потерь в стали:  $\delta = (90 - \varphi_0)$ .

### Опыт короткого замыкания трансформатора

Из опыта короткого замыкания трансформатора можно определить сопротивление обмоток, напряжение короткого замыкания и потери в меди (в обмотках).

Опыт короткого замыкания производится следующим образом. Вторичная обмотка замыкается накоротко через амперметр, на первичную обмотку подается напряжение, пониженное до такой величины, при которой токи в обмотках равны номинальным. Это напряжение называется напряжением короткого замыкания  $U_K$  и равно примерно 5-10% номинального напряжения ( $U_H = 220$  В).

Мощность в режиме короткого замыкания расходуется на нагрев обмоток, т.е. на потери в меди:

$$P_{1K} = I_{1K}^2 r_K, \quad \text{откуда} \quad r_K = \frac{P_{1K}}{I_{1K}^2},$$

где  $r_K = r_1 + r_2'$ ,  $r_2' = n_2 r_2$  — приведенное к первичной обмотке активное сопротивление вторичной обмотки трансформатора.

Полное сопротивление короткого замыкания определяется по формуле

$$Z_K = \frac{U_K}{I_{2H}}.$$

Индуктивное сопротивление короткого замыкания:

$$X_K = \sqrt{Z_K^2 - r_K^2},$$
$$X_K = X_1 + X_2' = X_1 + X_2 n^2.$$

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi_K = \frac{r_K}{Z_K} = \frac{P_{1K}}{U_{1K} I_{1K}}.$$

Напряжение короткого замыкания:

$$U_K = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} 100\%.$$

### Внешняя характеристика трансформатора

Зависимость напряжения  $U_2$  на зажимах вторичной обмотки трансформатора от тока нагрузки  $I_2$  при неизменном напряжении на зажимах первичной обмотки при постоянном коэффициенте мощности называется *внешней характеристикой* трансформатора. Для снятия внешней характеристики при активной нагрузке ( $\cos \varphi = 1$ ) следует подвести к первичной обмотке номинальное напряжение и при разомкнутой вторичной обмотке записать показания приборов. Затем, постепенно увеличивая нагрузку, записать показания приборов. При помощи внешней характеристики можно определить процентное изменение напряжения по формуле

$$\Delta U \% = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}},$$

где  $U_{20}$  — напряжение на зажимах вторичной обмотки при холостом ходе;  
 $U_2$  — напряжение при данной нагрузке.

Коэффициент полезного действия трансформатора определяется из опытов холостого хода, короткого замыкания и нагрузки. При этом потери в стали, определяемые из опыта холостого хода, не зависят от нагрузки.

Потери в меди, определяемые из опыта короткого замыкания, пропорциональны квадрату тока. Таким образом:

$$\eta = \frac{P_{2H}}{P_{1H}} = \frac{P_{2H}}{P_{2H} + P_0 + P_K},$$

где  $P_{2H} = S_{2H} \cos \varphi$  — номинальная мощность трансформатора;  
 $S_H$  — полная мощность трансформатора.

Для любой нагрузки коэффициент полезного действия определяется по формуле

$$\eta = \frac{\beta S_H \cos \varphi_2}{\beta S_H \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K} 100\%,$$

где  $P_2 = \beta S_H \cos \varphi_2$  — мощность, отдаваемая трансформатором;  
 $\beta$  — коэффициент загрузки трансформатора:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}.$$

Задаваясь величиной коэффициента загрузки, можно построить кривую зависимости  $\eta = f(P_2)$ .

### Порядок выполнения работы

1. Собрать схему согласно рисунку 9.1.

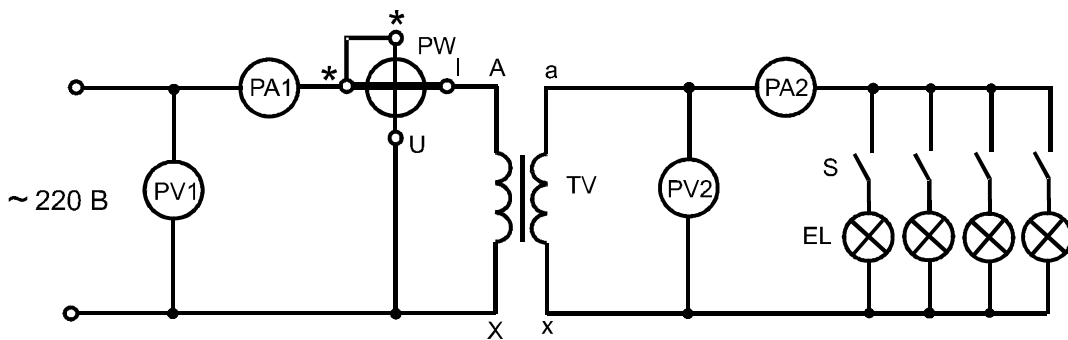


Рис. 9.1. Схема для испытания трансформатора на холостом ходу и под нагрузкой

2. После проверки схемы преподавателем включить схему под напряжение и произвести опыт холостого хода при выключенной нагрузке (тумблеры ламповой нагрузки отключены). Данные измерений занести в таблицу 9.1.

Таблица 9.1. Результаты исследования холостого хода трансформатора

Измерено				Вычислено				
$U_1, \text{В}$	$U_{20}, \text{В}$	$I_{10}, \text{А}$	$P_0, \text{Вт}$	$n$	$\cos \varphi_0$	$\varphi_0$	$S, \text{ВА}$	$\delta$

3. По данным опыта вычислить: коэффициент трансформации  $n$ , полную мощность  $S$ , коэффициент мощности  $\cos \varphi$ , угол потери в стали  $\delta$ .

4. Устанавливая тумблерами различную нагрузку, произвести испытание трансформатора под нагрузкой (3-4 значения). Данные измерений занести в таблицу 9.2.

Таблица 9.2. Результаты исследования трансформатора под нагрузкой

Измерено					Вычислено				
$U_1, \text{В}$	$I_1, \text{А}$	$P_1, \text{Вт}$	$I_2, \text{А}$	$U_2, \text{В}$	$\cos \varphi_1$	$\beta$	$P_2, \text{Вт}$	$\eta$	$\Delta U, \%$

5. По результатам измерений построить внешнюю характеристику трансформатора и определить процентное изменение напряжения  $\Delta U, \%$ .

6. Собрать схему согласно рисунку 9.2. В схеме предусмотреть лабораторный автотрансформатор, вольтметр 7,5...60 В и амперметр РА-2 на 5 А.

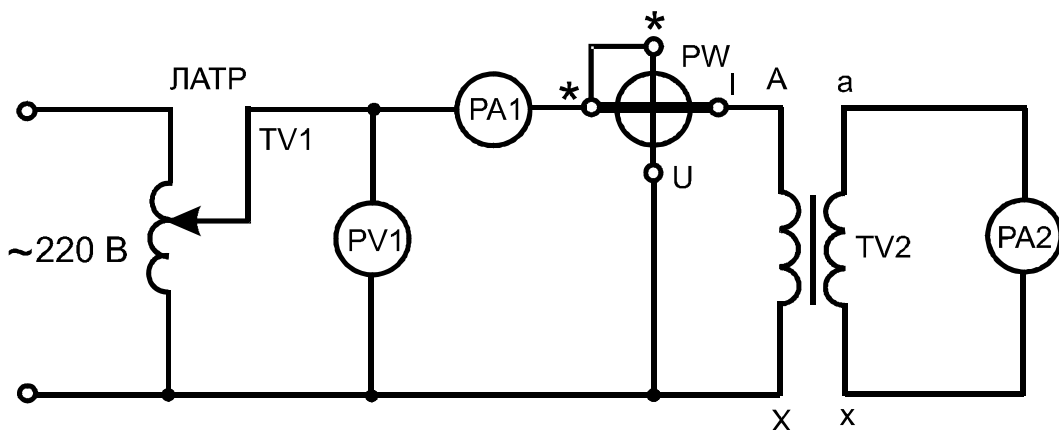


Рис. 9.2. Схема для исследования опыта короткого замыкания трансформатора

7. Рассчитать номинальные токи  $I_{1H}$  и  $I_{2H}$  трансформатора. Величины номинальных токов можно определить на основе паспортных данных трансформатора. После проверки схемы преподавателем включить схему под напряжение и произвести опыт короткого замыкания. Для этого к первичной обмотке трансформатора подвести такое напряжение, при котором в первичной и вторичной обмотках установятся номинальные токи. Данные измерений занести в таблицу 9.3.

Таблица 9.3. Результаты опыта короткого замыкания трансформатора

Измерено				Вычислено				
$U_{1K}$ , В	$I_{1K}$ , А	$P_{1K}$ , Вт	$I_2$ , А	$\cos \varphi_K$	$Z_K$ , Ом	$r_K$ , Ом	$X_K$ , Ом	$U_K$ , %

8. По данным опыта короткого замыкания вычислить: полное сопротивление  $Z_K$ , активное сопротивление  $r_K$ , реактивное сопротивление  $X_K$ .

#### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Схемы и таблицы.
3. Расчетные формулы.
4. Внешняя характеристика трансформатора.
5. Выводы по проделанной работе.

#### Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия трансформатора.
2. Что такое коэффициент трансформации?
3. С какой целью проводятся опыты холостого хода и короткого замыкания?
4. Какая зависимость называется внешней характеристикой трансформатора?
5. Как определить КПД трансформатора?
6. Как определить число витков вторичной обмотки при известном числе витков первичной обмотки, напряжении  $U_1$  и  $U_2$ ?
7. Почему сердечник трансформатора набирают из пластин электротехнической стали?
8. Устройство трехфазного силового трансформатора.
9. Устройство измерительных трансформаторов.
10. Требования к сварочным трансформаторам.
11. Назовите существующие виды трансформаторов и область их применения.

### *Список рекомендуемых источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 166.
2. Жаворонков, М.А. Электротехника и электроника / М.А. Жаворонков, А.В. Кузин. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 170-171, 178-182.
3. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 256-271.
4. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — С. 367-399.



## Лабораторная работа 10

### Пуск трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором

*Цель работы:* овладение практическими навыками по сборке схем управления трехфазным асинхронным электродвигателем с короткозамкнутым ротором при помощи нереверсивного магнитного пускателя.

#### *Основные теоретические сведения*

Асинхронная машина имеет статор (неподвижная часть) и ротор (вращающаяся часть), разделенные воздушным зазором. Ее активными частями являются обмотки и магнитопровод (сердечник); все остальные части — конструктивные, обеспечивающие необходимую прочность, жесткость, охлаждение, возможность вращения и т. п.

Обмотка статора представляет собой трехфазную (в общем случае — многофазную) обмотку, проводники которой равномерно распределены по окружности статора и пофазно уложены в пазах с угловым расстоянием  $120^\circ$ . Фазы обмотки статора соединяют по стандартным схемам «треугольник» или «звезда» и подключают к сети трехфазного тока. Магнитопровод статора переманчивается в процессе изменения тока в обмотке статора, поэтому его набирают из пластин электротехнической стали для обеспечения минимальных магнитных потерь.

По конструкции ротора асинхронные машины подразделяют на два основных типа: с *короткозамкнутым* ротором и с *фазным* ротором. Оба типа имеют одинаковую конструкцию статора и отличаются лишь исполнением обмотки ротора. Магнитопровод ротора выполняется аналогично магнитопроводу статора — из пластин электротехнической стали.

Трехфазный асинхронный электродвигатель с короткозамкнутым ротором (в дальнейшем ТАД) является наиболее распространенным видом электродвигателей.

Короткозамкнутая обмотка ротора, часто называемая «беличье колесо» (или «беличья клетка») из-за внешней схожести конструкции, состоит из алюминиевых (реже медных, латунных) стержней, замкнутых накоротко с торцов двумя кольцами. Стержни этой обмотки вставляют в пазы сердечника ротора. Сердечники ротора и статора имеют зубчатую структуру. В машинах малой и средней мощности обмотку обычно изготавливают путем заливки расплавленного алюминиевого сплава в пазы сердечника ротора. Вместе со стержнями «беличьего колеса» отливают короткозамыкающие кольца и торцевые лопасти, осуществляющие вентиляцию машины. В машинах большой мощности «беличье колесо» выполняют из медных стержней, концы которых соединяют с короткозамыкающими кольцами при помощи сварки.

ТАД при прямом пуске (без регулирования) имеют небольшой пусковой момент и значительный пусковой ток, что является существенным их недостатком. Поэтому их применяют в тех электрических приводах, где не требуются большие пусковые моменты. Из достоинств следует отметить легкость в изготовлении и отсутствие электрического контакта со статической частью машины, что гарантирует долговечность и снижает затраты на обслуживание.

Основная схема ТАД — нереверсивная схема управления при помощи магнитного пускателя.

Магнитный пускатель предназначен для *ручного, дистанционного или автоматического* управления ТАД. Он состоит из корпуса, тягового электромагнита и связанной с ним контактной системы. Контактная система состоит из *силовых и вспомогательных* контактов. Тяговый электромагнит (катушка) может управляться от источника постоянного или переменного напряжений. В магнитных пускателях переменного тока магнитопровод выполнен из листов электротехнической стали (0,35...0,5 мм) для уменьшения потерь на перемагничивание. Для уменьшения вибрации сердечника в его торцевой части установлено медное короткозамкнутое кольцо.

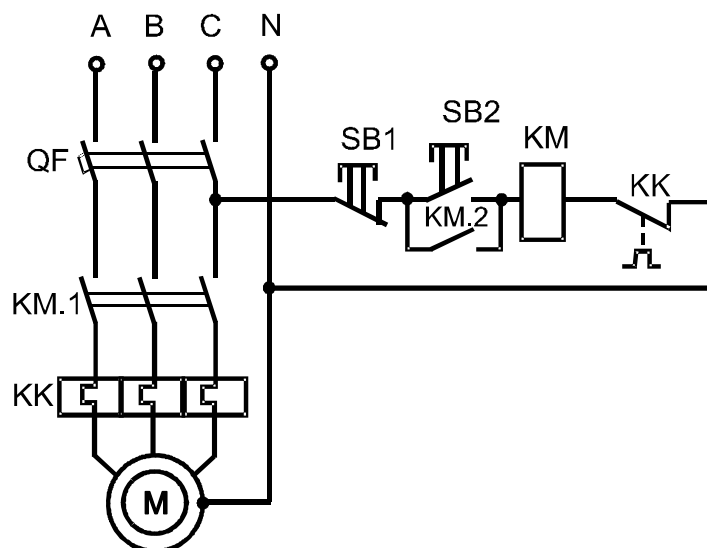
Для управления магнитным пускателем служит кнопочная станция (кнопочный пост). Простейшая кнопочная станция состоит из двух кнопок, одна из которых служит для подачи напряжения на катушку — кнопка «Пуск» (черного цвета), а другая для снятия напряжения с катушки — кнопка «Стоп» (красного цвета). Более сложные кнопочные посты могут иметь от трех и более кнопок.

Наиболее распространены магнитные пускатели серий ПМЕ, ПМЛ, ПМА. Они позволяют осуществить до 150 включений в час. Катушки магнитных пускателей изготавливаются на напряжения 110, 127, 220, 380 и 660 В. При выборе магнитных пускателей обращают внимание на *наибольшую допустимую мощность электродвигателя* и на *напряжение катушки*. В сети 380/220 В можно использовать катушки как с напряжением 380, так и 220 В. В первом случае катушка должна включаться на линейное напряжение (две любые фазы), во втором — на фазное (любая фаза и нуль).

Для защиты электродвигателя и схемы управления от коротких замыканий применяются плавкие предохранители и автоматические выключатели с электромагнитными расцепителями.

Для защиты электродвигателя от перегрузки используют тепловые реле и автоматические выключатели с тепловыми расцепителями. Плавкие предохранители от перегрузки электродвигателя не защищают.

Рассмотрим работу принципиальной электрической схемы управления трехфазным электродвигателем при помощи магнитного пускателя (рис. 10.1).



*Рис. 10.1. Принципиальная электрическая схема пуска трехфазного асинхронного электродвигателя с использованием магнитного пускателя*

Включением автоматического выключателя QF подается напряжение на схему управления. При нажатии кнопки SB2 «Пуск» протекает ток по цепочке: фаза C → SB1 → SB2 → катушка KM → контакт теплового реле КК → нулевой провод N. Следовательно, катушка KM получает питание и втягивает в себя сердечник с контактной группой. Контакты KM.1 замыкаются, и на электродвигатель подается трехфазное напряжение.

Для того чтобы двигатель не остановился после отпущения кнопки SB2, параллельно ей подключается вспомогательный контакт KM.2.

Тепловое реле КК срабатывает при увеличении значения тока сверх допустимой нормы (при перегрузке), размыкая свой контакт КК в цепи питания катушки магнитного пускателя KM. Повторный пуск ТАД после срабатывания теплового реле возможен только после ручного возврата контактов реле в исходное положение (при помощи специальной кнопки на тепловом реле) через некоторое время, необходимое для остывания нагревательного элемента теплового реле.

Перед новым пуском трехфазного электродвигателя необходимо устранить причины, приведшие к срабатыванию тепловой защиты.

Для того чтобы изменить направление вращения электродвигателя (реверсировать), необходимо поменять местами любые две фазы. Для реверсирования обычно применяют специальные реверсивные магнитные пускатели, где процесс смены фаз происходит автоматически.

### Пуск трехфазного электродвигателя в однофазном режиме

При отсутствии у потребителя трехфазного напряжения трехфазный электродвигатель можно запустить в однофазном режиме. На рисунке 10.2 приведены основные схемы для такого пуска.

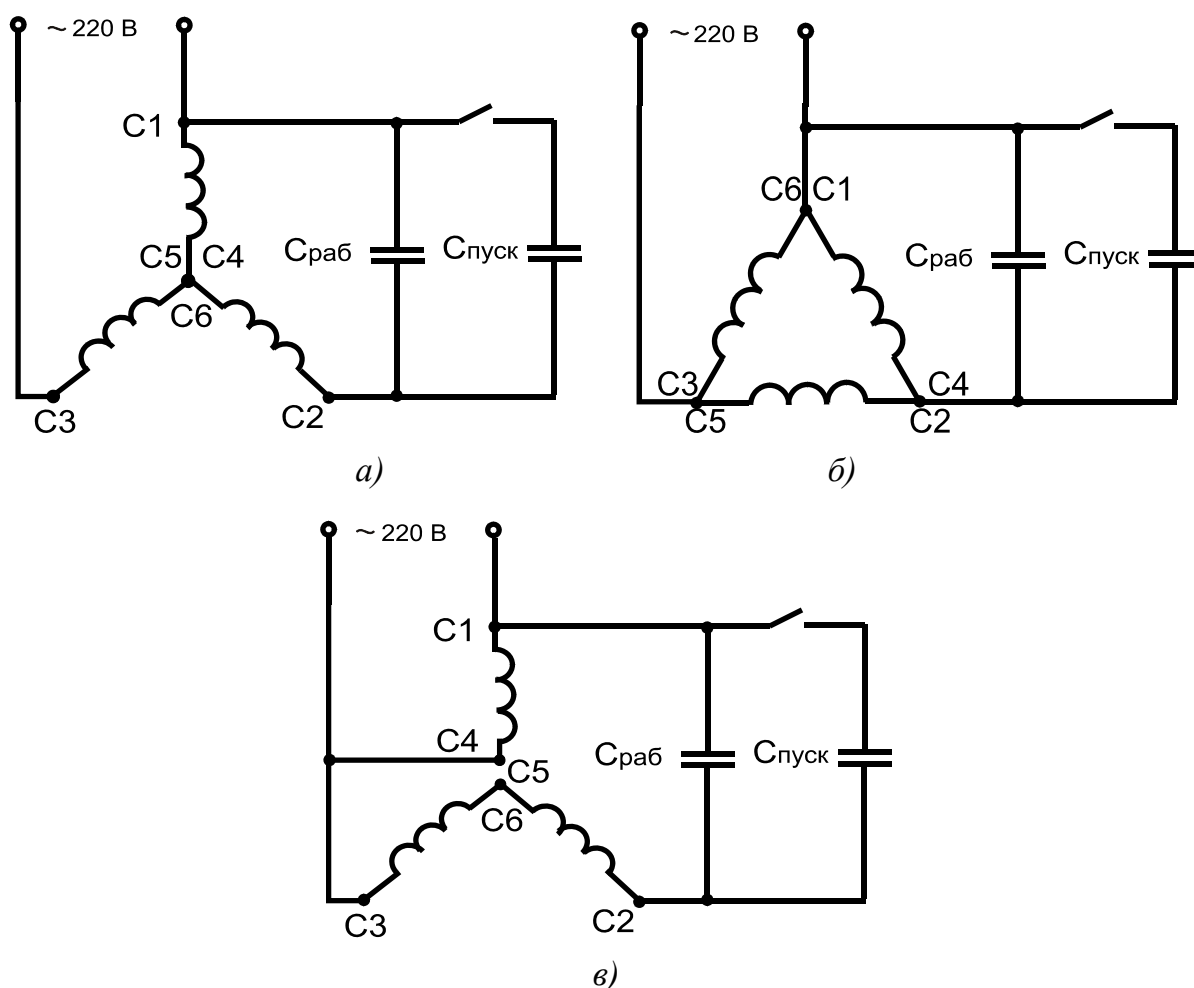


Рис. 10.2. Схемы пуска (а, б, в) трехфазного асинхронного электродвигателя в однофазном режиме

Так как при подключении одной фазы вращающееся магнитное поле отсутствует, то для вращения ротора электродвигателя необходимо обеспечить сдвиг токов в пусковой и рабочей обмотках относительно друг друга. Для обеспечения фазового сдвига обычно используют конденсаторы.

Емкость конденсаторов рассчитывается следующим образом. Так как для пуска необходима большая емкость, чем для рабочего режима, то

$$C_{\text{пуск}} = (2 \dots 2,5) C_{\text{раб}}.$$

После запуска электродвигателя пусковые конденсаторы отключают в целях уменьшения нагрева обмоток статора.

Рабочая емкость определяется на основе паспортных данных электродвигателя:

– для схемы (рис. 10.2, а)  $C_{\text{раб}} = \frac{2800I_H}{U_H};$

– для схемы (рис. 10.2, б)  $C_{\text{раб}} = \frac{4800I_H}{U_H};$

– для схемы (рис. 10.2, в)  $C_{\text{раб}} = \frac{1600I_H}{U_H}.$

В качестве пусковых и рабочих емкостей применяются конденсаторы марок БГГ, МБГ4, МБГО и другие, на напряжение не меньше амплитудного.

Мощность электродвигателя в однофазном режиме составляет примерно половину мощности, развиваемой ТАД в трехфазном режиме.

### *Порядок выполнения работы*

1. Собрать схему согласно рисунку 10.3. Для сборки схемы использовать специальный блок лабораторного стенда «Магнитный пускатель». Обмотки электродвигателя соединить по схеме «треугольник».

2. После проверки преподавателем схемы произвести пробный пуск электродвигателя.

3. Произвести реверсирование электродвигателя.

4. Собрать одну из схем согласно рисунку 10.2. Сборку схемы производить без использования блока «Магнитный пускатель». В качестве пусковой и рабочей емкости использовать магазин емкостей лабораторного стенда.

5. Рассчитать пусковую и рабочую емкости, используя паспортные данные, указанные на самом электродвигателе. Установить пусковую емкость на магазине емкостей.

6. После проверки преподавателем схемы произвести пробный пуск электродвигателя в однофазном режиме. После разгона электродвигателя переключить пусковую емкость на рабочую.

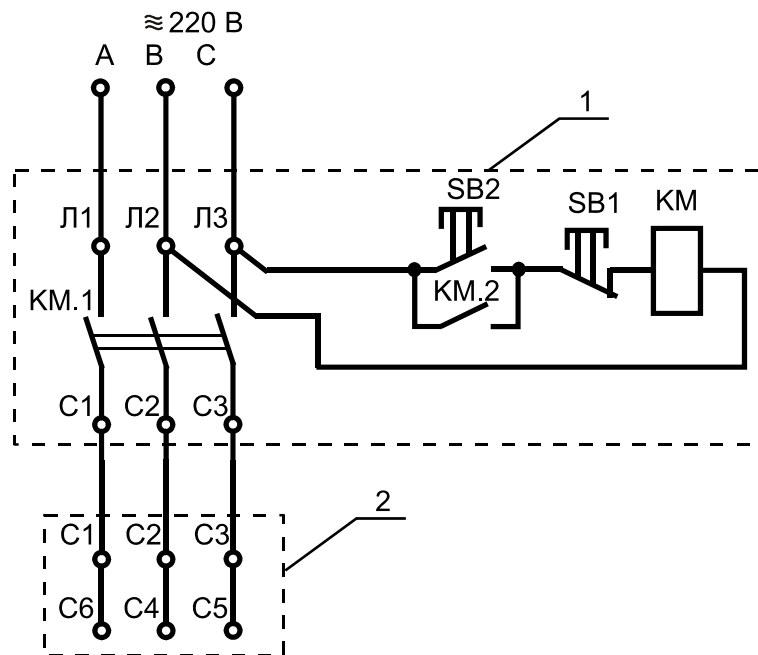


Рис. 10.3. Принципиальная электрическая схема пуска электродвигателя на лабораторном стенде:  
 1 — блок «Магнитный пускатель» лабораторного стенда;  
 2 — щиток вывода обмоток асинхронного электродвигателя

7. Произвести реверсирование электродвигателя в однофазном режиме.
8. Отключить напряжение, разобрать схему.

### Содержание отчета

1. Наименование и цель работы.
2. Принципиальные электрические схемы исследований (см. рис. 10.2, 10.3).
3. Данные вычисленных значений пусковых и рабочих емкостей.
4. Выводы по работе.

### Контрольные вопросы

1. Устройство и принцип действия трехфазного асинхронного короткозамкнутого двигателя переменного тока.
2. Почему двигатель называется асинхронным?
3. Устройство и принцип действия магнитного пускателя.
4. Принцип работы схемы пуска при помощи магнитного пускателя.
5. Назначение вспомогательного контакта, подключенного параллельно кнопке «Пуск».

6. Для чего устанавливается конденсатор при пуске электродвигателя в однофазном режиме?
7. Как изменить направление вращения трехфазного электродвигателя?
8. Как защищается электродвигатель от коротких замыканий?
9. Как защищается электродвигатель от перегрузок?
10. Почему при пуске электродвигателя в трехфазном режиме обмотка статора подключается по схеме «треугольник»?
11. Как определяется вращающий момент асинхронного электродвигателя?
12. Как осуществляется регулирование скорости вращения электродвигателя?
13. Как определяется коэффициент полезного действия и коэффициент мощности трехфазного электродвигателя?
14. Как определяется скольжение и частота вращения ротора электродвигателя?
15. Назовите два типа асинхронных машин в зависимости от конструкции ротора.
16. Назовите достоинства и недостатки трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.

#### *Список рекомендуемых источников*

1. Касаткин, А.С. Электротехника / А.С. Касаткин, М.В. Немцов. — М. : Издательский центр «Академия», 2008. — С. 410-415, 443-444.
2. Белов, Н.В. Электротехника, основы электроники / Н.В. Белов, Ю.С. Волков. — СПб. : Лань, 2012. — С. 279-281, 356-363.
3. Данилов, И.А. Общая электротехника. — М. : Юрайт, 2013. — С. 322-334, 347-350.