

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по аграрному техническому образованию в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений высшего образования по специальностям 1-74 06 01 «Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства», 1-74 06 02 «Техническое обеспечение процессов хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», 1-74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве», 1-74 06 06 «Материально-техническое обеспечение агропромышленного комплекса», 1-74 06 07 «Управление охраной труда в сельском хозяйстве», 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники»

Минск
БГАТУ
2021

УДК 621.3 + 621.38(075)
ББК 32.85я7
О-75

Составители:

кандидат технических наук, доцент *А. П. Мириленко*,
старший преподаватель *Е. В. Зайцев*,
старший преподаватель *В. А. Курочкин*,
старший преподаватель *И. И. Скочек*,
старший преподаватель *Т. Ф. Гузанова*

Рецензенты:

кафедра механизации животноводства и электрификации производства
учреждения образования «Белорусская государственная
орденов Октябрьской Революции и Трудового Красного Знамени
сельскохозяйственная академия» (кандидат технических наук,
доцент, заведующий кафедрой *К. Л. Пузевич*);
кандидат технических наук, доцент, заведующий лабораторией
научного обеспечения испытаний и информационно-технических
технологий РУП «НПЦ НАН Беларуси по механизации
сельского хозяйства» *В. К. Клыбик*

Основы электротехники и электроники. Лабораторный практикум :
О-75 учебно-методическое пособие / сост. : А. П. Мириленко [и др.]. –
Минск : БГАТУ, 2021. – 116 с.
ISBN 978-985-25-0117-0.

Включает 10 лабораторных работ по дисциплине «Основы электротехники и электроники», правила и порядок выполнения лабораторных работ, список рекомендованной литературы и приложения.

Для студентов учреждений высшего образования, обучающихся по специальностям 1-74 06 01 «Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства», 1-74 06 02 «Техническое обеспечение процессов хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», 1-74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве», 1-74 06 06 «Материально-техническое обеспечение агропромышленного комплекса», 1-74 06 07 «Управление охраной труда в сельском хозяйстве», 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники».

УДК 621.3 + 621.38(075)
ББК 32.85я7

ISBN 978-985-25-0117-0

© БГАТУ, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	6
ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	8
<i>Лабораторная работа № 1</i> Проверка амперметра и вольтметра методом сличения с показаниями эталонов	10
<i>Лабораторная работа № 2</i> Исследование цепи синусоидального тока с последовательным соединением катушки индуктивности и конденсатора. Резонанс напряжений	16
<i>Лабораторная работа № 3</i> Исследование цепи синусоидального тока с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора. Резонанс токов. Компенсация реактивной мощности в цепях синусоидального тока.....	26
<i>Лабораторная работа № 4</i> Трехфазная цепь. Соединение нагрузки звездой.....	34
<i>Лабораторная работа № 5</i> Трехфазная цепь. Соединение нагрузки треугольником	43
<i>Лабораторная работа № 6</i> Испытание однофазного трансформатора	48
<i>Лабораторная работа № 7</i> Исследование трехфазного асинхронного двигателя с короткозамкнутым ротором.....	57

<i>Лабораторная работа № 8</i>	
Испытание генераторов электрической энергии	71
<i>Лабораторная работа № 9</i>	
Исследование неуправляемых выпрямителей	84
<i>Лабораторная работа № 10</i>	
Изучение логических элементов и комбинационных устройств	94
ПРИЛОЖЕНИЯ	103
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	113

ВВЕДЕНИЕ

Издание является пособием к проведению лабораторных работ в соответствии с программой учебной дисциплины «Основы электротехники и электроники» специальностей: 1-74 06 01 «Техническое обеспечение процессов сельскохозяйственного производства», 1-74 06 02 «Техническое обеспечение процессов хранения и переработки сельскохозяйственной продукции», 1-74 06 03 «Ремонтно-обслуживающее производство в сельском хозяйстве», 1-74 06 06 «Материально-техническое обеспечение агропромышленного комплекса», 1-74 06 07 «Управление охраной труда в сельском хозяйстве», 1-36 12 01 «Проектирование и производство сельскохозяйственной техники».

Лабораторный практикум включает десять лабораторных работ по темам: «Электроизмерительные приборы», «Теория электрических цепей», «Электрические машины и трансформаторы» и «Основы электроники». В описании каждой лабораторной работы указывается ее цель, даются методические указания по подготовке ее выполнения, теоретическое обоснование, приведены схемы лабораторных установок и порядок получения и обработки лабораторных показаний.

Теоретические сведения, которые приводятся в начале каждой лабораторной работы, занимают значительный объем и могут служить основой для самоподготовки студентов. Для более глубокого освоения дисциплины в конце пособия приведен список рекомендуемых учебников и учебных пособий.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Лабораторные занятия преследуют цель более глубокого усвоения теоретических вопросов путем экспериментальной проверки основных положений курса. Кроме того, эти занятия способствуют выработке навыков проведения исследований и анализа работы электрических схем.

Перед выполнением лабораторных работ каждый студент должен изучить правила безопасности, относящиеся к данной лаборатории.

Каждый студент обязан подготовиться к самостоятельному выполнению лабораторной работы. Предварительная подготовка состоит в изучении описания лабораторной работы и соответствующего теоретического материала по конспекту и учебным пособиям. Электрические схемы и таблицы для записи наблюдений (протокол наблюдений) должны быть подготовлены заранее. Лабораторные работы оформляются в тетради.

Перед началом выполнения каждой работы преподавателем проводится проверка готовности студентов к этой работе. Неподготовленные студенты к работе не допускаются.

Студентам перед началом работы нужно подробно ознакомиться с находящимся на рабочем месте оборудованием, т. е. узнать назначение каждого элемента оборудования, основные номинальные данные объекта испытания, а для приборов – пределы измерений, род тока и цену деления шкалы.

Каждая новая собранная электрическая цепь должна быть проверена преподавателем или инженерно-лаборантским составом и только с их разрешения может быть включена под напряжение. То же самое относится к цепям, когда в них произведены какие-либо изменения.

Во время выполнения лабораторных работ студенты должны строго выполнять правила безопасности и соблюдать учебную дисциплину. Лица, нарушающие правила безопасности, отстраняются от выполнения работы.

Проводя те или иные испытания, необходимо особенно тщательно определять и записывать показания приборов. Следует помнить, что небрежность в отсчете показаний приборов и записях обычно приводит к неправильным выводам о свойствах испытуемой схемы. При наличии грубых ошибок в испытаниях опыт или вся лабораторная работа должны быть переделаны.

При выполнении работы коллективно студенты должны распределить обязанности и затем, при выполнении последующих пунктов, этими обязанностями меняться. При этом все должны активно вникать в смысл испытаний.

После окончания каждого опыта и всей лабораторной работы необходимо ознакомить с результатами преподавателя и только после этого разбирать электрическую цепь.

После окончания лабораторной работы необходимо оборудование и приборы оставить на рабочем месте в том порядке, в каком они находились перед началом занятий. После этого студенты приступают к оформлению отчета.

Оформить отчет о проведенной работе должен каждый студент.

Содержание отчета:

1. Название работы, цель работы.
2. Схемы электрические принципиальные всех цепей, исследованных в данной работе.
3. Таблицы, графики или иные результаты всех опытов, проведенных в работе.
4. Расчетные формулы и результаты вычислений.
5. Анализ результатов и выводы.

Отчеты оформляются на специальных бланках или в обычной тетради аккуратно, с использованием чертежных инструментов и с соблюдением стандартных обозначений для элементов электрических схем.

Все графики должны быть выполнены в соответствующем масштабе и с обозначением величин. На графиках обязательно должны быть нанесены точки, по которым строились кривые.

Отчет о проведенной работе должен быть защищен студентом перед началом следующей работы. В противном случае студент не допускается к выполнению следующей лабораторной работы.

ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Исследование электрических цепей, установок и приборов неизбежно связано с применением повышенных напряжений. Поражение током при этих напряжениях может привести к тяжелым последствиям. Необходимо, чтобы лица, работающие в опасных условиях, постоянно и точно выполняли соответствующие правила безопасности.

В лабораториях электротехники и электроники опасными являются напряжения 110, 127, 220 В; опасными могут быть также ЭДС самоиндукции при размыкании цепей с большими индуктивностями, а также неразрядившиеся конденсаторы. Кроме того, при неправильных действиях с электрическим оборудованием возможны короткие замыкания и перегрузки в цепях, которые могут привести к появлению расплавленных капель металла и перегреву отдельных частей оборудования. Это может привести к поражению органов зрения и к ожогам.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности:

1. Прежде чем собирать схему, необходимо убедиться, что сетевой выключатель отключен.

2. При сборке электрической цепи соединение проводниками следует выполнить так, чтобы они не ложились на шкалы приборов, имели наименьшее число пересечений между собой и были надежно присоединены к клеммам. Все неиспользованные проводники должны быть убраны в ящик стола.

3. Включение схемы под напряжение разрешается только после проверки ее преподавателем или лаборантом.

4. Во время работы со схемой нужно быть внимательным и осторожным, находиться на рабочем месте и не допускать к нему посторонних. Каждый человек, включающий цепь под напряжение, должен предупредить о своем действии остальных членов бригады.

5. При обнаружении каких-либо неисправностей (повышенный шум, искрение, перегрев обмоток или проводов, отсутствие све-

чения сигнальной лампы) или при попадании кого-либо под напряжение нужно немедленно отключить выключатель и пригласить преподавателя.

6. Во время работы не касаться незащищенных частей электрических цепей, находящихся под напряжением, и открытых поверхностей реостатов во избежание ожогов.

7. Все переключения в схеме проводятся при отключенном стенде. После этого схему должен проверить преподаватель или лаборант.

8. После окончания работы необходимо показать преподавателю протокол наблюдения (результаты экспериментов) и только после этого, с разрешения преподавателя, разобрать схему и навести порядок на рабочем месте.

9. За порчу лабораторного оборудования, вызванную небрежным обращением с ним или невыполнением требований данного руководства, студенты несут ответственность.

Лабораторная работа № 1
**ПОВЕРКА АМПЕРМЕТРА И ВОЛЬТМЕТРА
МЕТОДОМ СЛИЧЕНИЯ С ПОКАЗАНИЯМИ ЭТАЛОНОВ**

Цель работы: ознакомиться с общими требованиями и правилами поверки, усвоить основные метрологические понятия, произвести поверку амперметра и вольтметра.

Общие сведения из теории

Поверка приборов. Виды погрешностей

При любом измерении возможны погрешности, т. е. отклонения результатов измерений от истинного значения измеряемой величины, которые обуславливаются несовершенством измерительного механизма, влиянием внешних факторов (наличием магнитных и электрических полей, изменением магнитных и электрических полей, изменением температуры окружающей среды и т. д.), несовершенством органов чувств человека и другими случайными факторами.

Разность между измеренным значением X и действительным значением измеряемой величины X_d , выраженная в единицах измеряемой величины, называется *абсолютной погрешностью* измерения.

$$\Delta X = X - X_d.$$

Величина, обратная по знаку абсолютной погрешности, носит название *поправки*.

$$\Delta P = -\Delta X = X_d - X.$$

Для оценки точности произведенного измерения служит относительная погрешность δ , которая представляет собой отношение абсолютной погрешности к действительному значению измеряемой величины, выраженное обычно в процентах:

$$\delta = \frac{\Delta X}{X_d} \cdot 100 \% \approx \frac{\Delta X}{X} \cdot 100 \%.$$

Из выражения относительной погрешности видно, что более точные измерения будут в конце шкалы.

Если абсолютная погрешность мало зависит от измеряемой величины, то класс точности измерительных приборов оценивают по допустимой основной приведенной погрешности. *Приведенная погрешность* – это отношение абсолютной погрешности измерения к нормирующему значению, выраженное в процентах:

$$\gamma = \frac{\Delta X}{X_N} \cdot 100 \%,$$

где X – показания прибора;

X_d – действительное значение измеряемой величины (показания эталона);

X_N – нормирующее значение.

Нормирующее значение принимается равное, чаще всего, диапазону измерений устройства или предельному значению. Например, для фазометра с диапазоном измерений от -90° до $+90^\circ$ нормирующее значение $\varphi_N = 180^\circ$.

При установлении класса точности так же нормируется вариация показаний.

Вариация показаний измерительного прибора – разность показаний в одной и той же точке шкалы при плавном подходе со стороны больших и меньших значений.

$$\nu = \frac{X_{дв} - X_{ду}}{X_N} \cdot 100 \%,$$

где $X_{дв}$ – показания эталона при возрастающих;

$X_{ду}$ – при убывающих значениях измеряемой величины.

Для технических приборов вариация не должна превышать абсолютного значения основной приведенной погрешности прибора. То есть, при нормальных условиях окружающей среды, у прибора класса точности 1,5 приведенная погрешность и вариация не должны превышать 1,5 %.

Для подтверждения пригодности к эксплуатации средства измерения подвергаются периодической поверке. Так же поверка в обязательном порядке должна проводиться при выпуске прибора из производства, после ремонта и регулировки. Поверка измерительного

прибора должна включать его внешний осмотр, определение погрешности и документальное оформление поверки.

Электроизмерительные приборы классов точности 0,5; 1,0; 1,5; 2,5; 4 поверяются по методу сличения их показаний с показаниями рабочих эталонов. При этом необходимо выполнить следующие метрологические условия:

1. Допустимая абсолютная погрешность рабочего эталона должна быть не менее чем в 4 раза меньше допустимой абсолютной погрешности поверяемого прибора, или в 2,5 раза меньше при введении поправок в показания рабочего эталона.

2. Диапазоны частот и измерений рабочих эталонов должны включать соответствующие диапазоны поверяемого прибора.

3. Указатели (стрелки) приборов устанавливают корректором на нулевую отметку шкалы при отключенных цепях тока и напряжения.

4. Поверка приборов осуществляется для всех числовых отметок шкалы при возрастании и убывании измеряемой величины.

Программа работы и порядок ее выполнения

Опыт 1. Поверка амперметра

Для поверки амперметра необходимо:

1. Собрать цепь по схеме (рис. 1.1), используя приборы и элементы лабораторного стенда. На рис. 1.1 PA_x – поверяемый амперметр (по указанию преподавателя); PA_0 – рабочий эталон; R – резистор; TV – лабораторный автотрансформатор (ЛАТр); QF – автоматический выключатель.

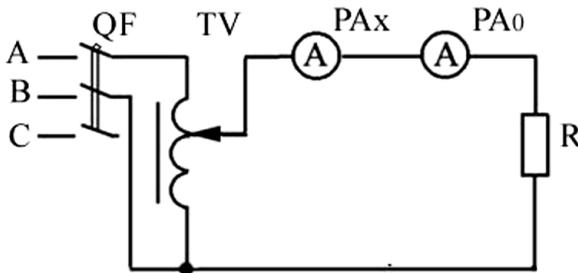


Рис. 1.1. Схема поверки амперметра

2. Убедиться, что движок ЛАТра установлен в положение, соответствующее минимальному значению напряжения на выходе, подать напряжение на цепь.

3. Меняя напряжение, подаваемое на электрическую цепь с помощью ЛАТра, произвести поверку амперметра на всех числовых отметках его шкалы (0; 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0 А) при возрастании и убывании измеряемой величины.

4. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.1.

В таблице $I_{ДВ}$, $I_{ДУ}$ – показания эталонного прибора при изменении питающего напряжения вверх и вниз соответственно.

Таблица 1.1

Результаты проведения поверки амперметра

№ п. п.	Измерено			Вычислено				
	I , А	$I_{ДВ}$, А	$I_{ДУ}$, А	ΔI , А	ΔP , А	δ , %	γ , %	V , %
1	0							
2	0,2							
3	0,4							
4	0,6							
5	0,8							
6	1,0							

5. При расчете абсолютной погрешности $\Delta I = I - I_d$ принять действительное значение $I_{ДВ}$ или $I_{ДУ}$, дающее большее значение ΔI .

6. По результатам измерений определить погрешности и вариацию поверяемого амперметра и дать заключение о его годности.

Опыт 2. Поверка вольтметра

1. Собрать схему на лабораторном стенде согласно рис. 1.2.

2. Убедиться, что движок ЛАТра установлен в положение, соответствующее минимальному значению напряжения на выходе, подать напряжение на цепь.

На рис. 1.2 PV_x – поверяемый вольтметр; PV_0 – рабочий эталон.

3. Меняя напряжение, подаваемое на электрическую цепь с помощью ЛАТра, произвести поверку вольтметра на всех числовых метках его шкалы (0; 50; 100; 150; 200; 250) при возрастании и убывании измеряемой величины.

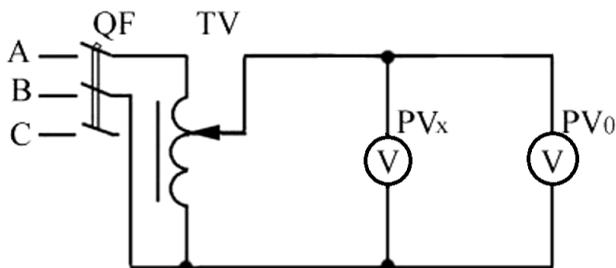


Рис. 1.2. Схема поверки вольтметра

4. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Результаты проведения поверки вольтметра

№ п. п.	Измерено			Вычислено				
	U , В	$U_{дв}$, В	$U_{ду}$, В	ΔU , В	ΔP , В	δ , %	γ , %	ν , %
1	0							
2	50							
3	100							
4	150							
5	200							
6	250							

В таблице $U_{дв}$, $U_{ду}$ – показания эталонного прибора при изменении питающего напряжения вверх и вниз соответственно.

5. При расчете абсолютной погрешности $\Delta U = U - U_d$ принять действительное значение $U_{дв}$ или $U_{ду}$, дающее большее значение ΔU .

6. По результатам измерений определить погрешности и вариацию поверяемого вольтметра и сделать вывод о его годности.

Содержание отчета:

1. Название и цель работы.
2. Конспективная запись изученного теоретического материала в соответствии с программой работы.

3. Схемы исследований и таблицы экспериментальных и расчетных данных.

4. Выводы о годности поверяемых приборов и предполагаемом их классе точности.

Вопросы для самоконтроля:

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

2. Объясните принцип действия электроизмерительных приборов магнито-электрической системы.

3. Объясните принцип действия электроизмерительных приборов электромагнитной системы.

4. Поясните способ расширения предела измерения амперметра и вольтметра постоянного тока.

5. Назовите все виды погрешностей и дайте им характеристику.

6. Что такое абсолютная, относительная и приведенная погрешности?

7. По какой погрешности устанавливается класс точности электроизмерительных приборов?

8. Сформулируйте требования, предъявляемые к эталонному прибору.

9. Изложите методику поверки технических электроизмерительных приборов методом сравнения с показаниями эталонов.

10. Определите абсолютную погрешность, допускаемую заданным прибором.

Лабораторная работа № 2
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО
ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ
КАТУШКИ ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА.
РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ**

Цели работы: 1) изучить и экспериментально проверить основные свойства электрической цепи переменного тока с нагрузкой в виде последовательного соединения активного, индуктивного и емкостного сопротивлений; 2) исследовать резонанс напряжений.

Общие сведения из теории

Схема электрической цепи с последовательным соединением активного, индуктивного и емкостного сопротивлений представлена на рис. 2.1, на котором R – активное сопротивление; L – индуктивность катушки индуктивности; C – емкость конденсатора.

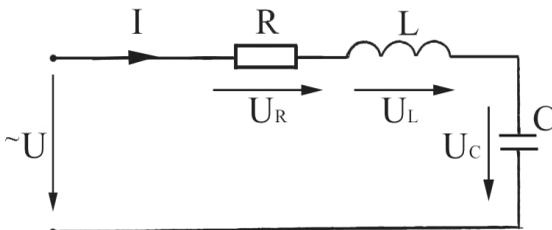


Рис. 2.1. Последовательное соединение элементов R , L и C

В соответствии с законом Ома связь между током и напряжением для действующих значений можно представить выражением:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}},$$

где $Z = \sqrt{R^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ – полное сопротивление цепи;

R , X_L , X_C – соответственно активная, индуктивная и емкостная составляющие полного сопротивления цепи.

В комплексной форме закон Ома можно представить выражением:

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{\dot{U}}{R + j\left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)},$$

где \dot{U} – комплекс действующего значения напряжения на входе цепи;
 \underline{Z} – комплекс полного сопротивления цепи.

Индуктивное и емкостное сопротивления цепи зависят не только от физических параметров катушки и конденсатора, а также и от частоты питающего напряжения f .

Эта зависимость определяется выражениями:

$$X_L = \omega L = 2\pi fL, \quad X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi fC}.$$

Соответственно с ростом частоты f сопротивление катушки индуктивности X_L будет также расти, а сопротивление конденсатора X_C уменьшаться. В цепях постоянного тока $f = 0$, следовательно, $X_L = 0$ (катушка не оказывает сопротивление постоянному току), а $X_C = \infty$ (разрыв цепи постоянного тока).

Приложенное к рассматриваемой электрической цепи питающее напряжение U уравнивается падением напряжения на отдельных ее участках.

Согласно второму закону Кирхгофа, этому положению соответствует равенство:

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

Векторная диаграмма для рассматриваемой цепи, из которой можно выделить треугольник напряжений abc , представлена на рис. 2.2.

Гипотенуза треугольника напряжений соответствует действующему значению приложенного к цепи напряжения U , а катеты – активной и реактивной составляющим этого напряжения.

Угол φ между векторами напряжения и тока называется *углом сдвига фаз* и определяется разностью начальных фаз напряжения и тока, т. е. $\varphi = \psi_u - \psi_i$.

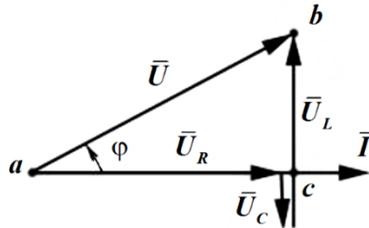


Рис. 2.2. Треугольник напряжений

Разделив величины длин сторон треугольника напряжений на число, равное действующему значению тока в рассматриваемой цепи, получим треугольник, у которого стороны будут в масштабе соответствовать значениям сопротивлений этой цепи. Он называется *треугольником сопротивлений* (рис. 2.3.).

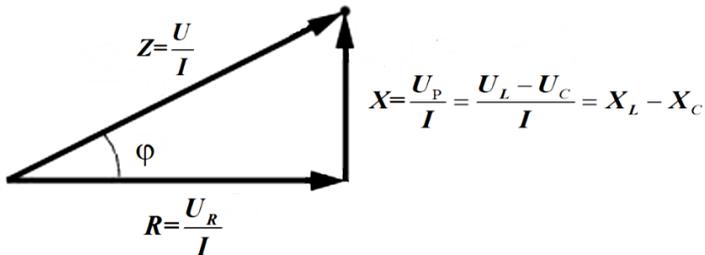


Рис. 2.3. Треугольник сопротивлений

Гипотенуза треугольника сопротивлений соответствует в масштабе полному сопротивлению цепи Z , а катеты – его активной R и реактивной X составляющим.

Значение φ зависит от соотношения активного и реактивного сопротивлений цепи. Из треугольника сопротивлений угол сдвига фаз можно определить как

$$\varphi = \operatorname{arctg} \frac{X}{R} = \operatorname{arctg} \frac{X_L - X_C}{R}.$$

В зависимости от соотношения X и R могут иметь место три характерных режима работы цепи:

- 1) активно-индуктивный, когда $X_L > X_C$, $\varphi > 0$ (рис. 2.4, а);
- 2) активно-емкостной, при котором $X_L < X_C$, $\varphi < 0$ (рис. 2.4, в);
- 3) активный, при котором $X_L = X_C$, $\varphi = 0$, т. е. ток и напряжение совпадают по фазе (рис. 2.4, б).

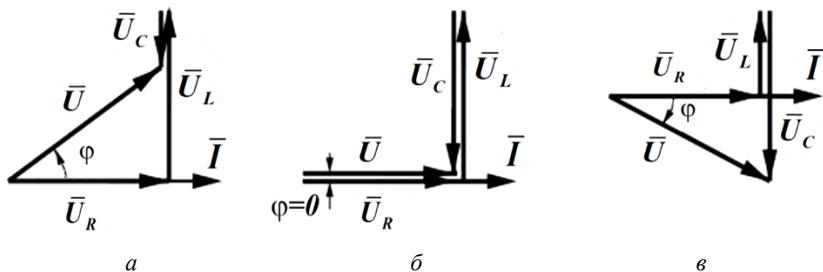


Рис. 2.4. Векторные диаграммы токов и напряжений при
 а – активно-индуктивной нагрузке;
 б – резонансе напряжений;
 в – активно-емкостной нагрузке

Наибольший интерес вызывает режим, при котором $X_L = X_C$. В этом случае возможен резонанс напряжений, основным проявлением которого можно назвать резкое увеличение величин напряжения на реактивных элементах цепи (усиление по напряжению). То есть напряжение на катушке индуктивности U_L и конденсаторе U_C могут в несколько раз превышать напряжение на входе цепи.

Резонанс напряжений – режим цепи синусоидального тока, с последовательным соединением R , L и C , при котором ее входное сопротивление чисто активно $Z = R$.

Условия возникновения резонанса напряжений

1. Необходимо последовательное соединение катушки индуктивности, обеспечивающей R и X_L , и конденсатора, обеспечивающего X_C . Это так называемый последовательный контур (реальная катушка индуктивности обладает не только реактивным сопротивлением, но и активным сопротивлением R).

2. Необходим источник синусоидального тока с частотой ω_C .
3. Необходимо, чтобы частота источника совпадала с собственной частотой контура (резонансной частотой ω_0). Резонансную частоту можно определить из условия $X_L = X_C$, т. е.

$$L\omega_0 = \frac{1}{\omega_0 C}, \text{ откуда } \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}.$$

4. Для усиления напряжения необходимо, чтобы $X_L = X_C > R$.

Признаки резонанса напряжений

1. Ток и напряжение, приложенное к цепи, совпадают по фазе $\varphi = 0$.
2. Сопротивление контура минимальное и чисто активное $Z = R$.
3. Ток в цепи максимален, т. к. $I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R} \rightarrow I_{\max}$.
4. Падение напряжения на активном сопротивлении равно приложенному к контуру напряжению, а именно: $U_R = IR = IZ = U$.
5. Падения напряжений на индуктивности и емкости равны по амплитуде, противоположны по фазе и больше (или значительно больше) приложенного напряжения:

$$U_L = IX_L = IX_C \gg U = IR.$$

Возникновение резонанса напряжений в электрических цепях (силовых) нежелательно. Чрезмерное повышение напряжений на емкостном и индуктивном элементах при резонансе может вывести их из строя.

В слаботочных (электронных, радиотехнических) цепях явление резонанса напряжений находит широкое применение. Благодаря усилению на реактивных элементах последовательной радиотехнической цепи (последовательный колебательный контур) при резонансе можно выделять напряжение, частота которого равна резонансной частоте цепи. Это позволяет осуществить прием и использование данного напряжения в системах радио-, телевизионного и радиолокационного приема.

Программа и порядок выполнения работы

Опыт 1. Исследовать простейшие электрические цепи переменного тока, имеющие резистор, катушку индуктивности или конденсатор

1. Собрать электрическую цепь согласно схеме, представленной на рис. 2.5.

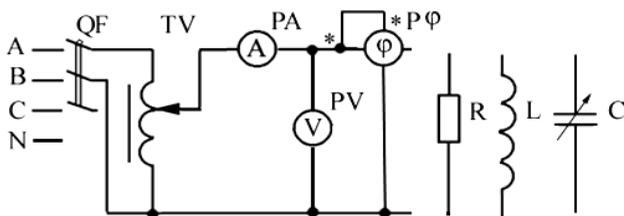


Рис. 2.5. Схема лабораторной установки для опыта 1

Резистор R , катушка индуктивности L , конденсатор переменной емкости C поочередно подключаются к электрической цепи в виде нагрузки для исследования.

2. При помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТр) установить на входе электрической цепи напряжение 50 В. Для каждого из подключенных в цепь нагрузочных элементов произвести измерения, результаты измерений занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Исследование элементов цепей переменного тока

Характер нагрузки	Показания приборов				Результаты расчетов					
	φ	$\cos \varphi$	I , А	U , В	S , ВА	P , Вт	Q , вар	R , Ом	L , Гн	C , мкФ
R (активная)									X	X
L (индуктивная)									X	X
C (емкостная)									X	X

Входящие в таблицу данные имеют следующий смысл:

φ – разность фаз между напряжением и током в цепи при данном виде нагрузки (активная, индуктивная, емкостная);

$\cos \varphi$ – коэффициент мощности;

I, U – ток и напряжение в цепи.

3. По показаниям прибора определить:

$S = UI, \text{ В} \cdot \text{А}$ – полную мощность электрической цепи;

$P = UI \cos \varphi, \text{ Вт}$ – активную мощность;

$Q = UI \sin \varphi, \text{ ВАр}$ – реактивную мощность;

R – активное сопротивление цепи;

L – индуктивность цепи;

C – емкость цепи.

При расчете следует помнить, что $Z = \frac{U}{I}, R = \frac{U}{I} \cos \varphi, X = \frac{U}{I} \sin \varphi,$

$$X = 2\pi fL, \quad X = \frac{1}{2\pi fC}, \quad f = 50 \text{ Гц.}$$

Результаты расчетов свести в табл. 2.1 и убедиться в следующем:

1) при активном сопротивлении нагрузки цепи напряжение и ток совпадают по фазе $\varphi = 0$;

2) при индуктивной нагрузке ток в цепи отстает по фазе от напряжения. В идеальном случае, когда сопротивление катушки носит чисто индуктивный характер, $\varphi = 90^\circ$. Для реальной катушки $\varphi < 90^\circ$;

3) при емкостной нагрузке ток в цепи опережает по фазе напряжение. В идеальном случае, когда сопротивление конденсатора носит чисто емкостной характер, $\varphi = -90^\circ$;

4) при активном сопротивлении нагрузки цепи реактивная мощность $Q = 0$ и полная мощность цепи равна активной $S = P$;

5) при нагрузке в виде катушки индуктивности или конденсатора полная мощность цепи будет иметь как активную, так и реактивную составляющие:

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

Опыт 2. Исследовать электрическую цепь переменного тока с последовательным соединением R, L, C

а) собрать электрическую цепь согласно электрической схеме, представленной на рис. 2.6, используя те же приборы и элементы;

б) при помощи лабораторного автотрансформатора установить на входе электрической цепи напряжение 80 В. Тумблером на

лабораторном стенде установить значение емкости конденсатора 6 мкФ, показания приборов записать в табл. 2.2;

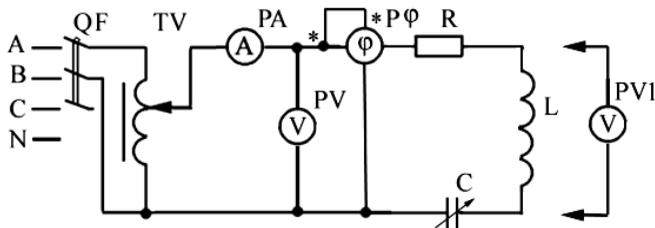


Рис. 2.6. Схема лабораторной установки для опыта 2

в) придавая емкости конденсатора ряд последовательных значений $C_1, C_2, C_3, C_4, C_5, C_6$, обязательно добиться резонанса и произвести измерения как минимум для двух значений емкости до резонанса и двух – после резонанса и выполнить расчет соответствующих электрических величин в цепи, заполнить табл. 2.2;

Таблица 2.2

Результаты исследования цепи с последовательным соединением элементов R, L, C

Значение емкости цепи, мкФ	Измерено							Вычислено						
	$U, В$	$I, А$	$U_R, В$	$U_L, В$	$U_C, В$	φ, \circ	$\cos\varphi$	$S, ВА$	$P, Вт$	$Q, Вар$	$R, Ом$	$X_L, Ом$	$X_C, Ом$	$Z, Ом$

$$Z = \frac{U}{I}, R = \frac{U}{I} \cos\varphi, X_C = \frac{U_C}{I} \sin\varphi_C \approx \frac{U_C}{I},$$

$$X_L = Z - X_C \quad \text{или} \quad X_L = \frac{U_L}{I} \sin\varphi_L,$$

φ_L и φ_C взять из табл. 2.1;

г) произвести анализ полученных результатов и убедиться в следующем:

- ток и напряжение в цепи с последовательно включенными активным, индуктивным и емкостным сопротивлениями обычно не совпадают по фазе $0^\circ < \varphi < 90^\circ$;
- ток в цепи при резонансе напряжений достигает максимума;
- падение напряжения на индуктивном и емкостном сопротивлениях возрастает и может превышать по величине значение напряжения, приложенного ко всей цепи.

Обработка результатов:

а) построить векторные диаграммы тока и напряжений в цепи для дорезонансного, резонансного и послерезонансного режимов (вектор напряжения на катушке индуктивности \dot{U}_L откладывать под углом φ_L , который для реальной катушки меньше 90°);

б) построить графики изменения $U_R, U_L, U_C, I, f, X_L, X_C$ в зависимости от изменения емкости C (построение всех кривых произвести в одной координатной системе).

Содержание отчета:

1. Название и цель работы.
2. Конспективная запись изученного теоретического материала в соответствии с программой работы.
3. Схемы исследований и таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Векторные диаграммы токов и напряжений.
5. Графики опытных и расчетных зависимостей, полученных в работе.
6. Основные выводы по результатам работы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Какие реальные электротехнические элементы обладают индуктивным, емкостным, активным сопротивлениями?
2. Как влияет изменение частоты питающего напряжения на величину активного, индуктивного и емкостного сопротивлений?
3. Закон Ома для цепи переменного тока с последовательным соединением активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

4. Что представляет собой треугольник напряжений и треугольник сопротивлений для цепи переменного тока с последовательным соединением активного, индуктивного и емкостного сопротивлений?

5. Условия возникновения и признаки резонанса напряжений.

6. Векторная диаграмма тока и напряжений в цепи с последовательным соединением активного, индуктивного и емкостного сопротивлений.

7. Какое практическое значение имеет резонанс напряжений для слаботочных и силовых цепей?

Лабораторная работа № 3
**ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА
 С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ КАТУШКИ
 ИНДУКТИВНОСТИ И КОНДЕНСАТОРА. РЕЗОНАНС
 ТОКОВ. КОМПЕНСАЦИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ
 В ЦЕПЯХ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА**

Цели работы: 1) исследовать режим резонанса токов в электрической цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора; 2) ознакомиться с понятием коэффициента мощности и компенсационным методом его повышения.

Общие сведения из теории

Резонанс токов возникает в цепи синусоидального тока при параллельном включении ветвей, содержащих R , L и C (рис. 3.1). Его можно трактовать как увеличение токов, текущих в ветвях (I_1 и I_2) по сравнению с током общей цепи I , т. е. при резонансе $I_1 \approx I_2$ могут быть больше или даже значительно больше I (явление усиления по току).

Исходя из первого закона Кирхгофа:

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

Для наглядности построим векторную диаграмму токов (рис. 3.2).

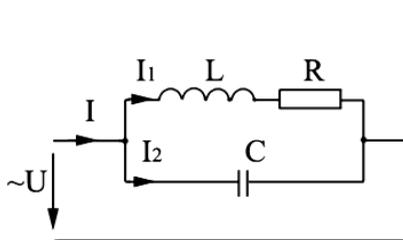


Рис. 3.1. Параллельное соединение ветвей, содержащих элементы R - L и C

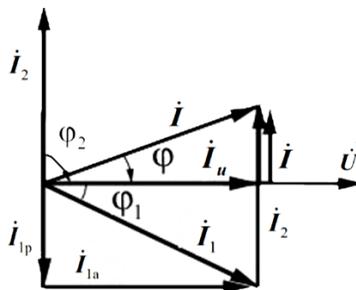


Рис. 3.2. Векторная диаграмма токов

Вектор тока \dot{I}_2 опережает вектор напряжения на 90° , а вектор тока \dot{I}_1 отстает от вектора напряжения на угол

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{X_L}{R}.$$

При резонансе токов необходимо, чтобы

$$I_1 = I_{1P} = I_1 \sin \varphi_1 = I_2,$$

где I_{1P} – реактивный ток в первой ветви.

Эти токи будут полностью компенсировать друг друга благодаря тому, что имеют разность фаз 180° , общий ток в неразветвленной части цепи совпадает по фазе с напряжением, т. е. становится чисто активным, угол $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$.

Аналитический расчет параллельных цепей переменного тока производится с помощью проводимостей. В данном случае общий ток цепи

$$I = Uy = U \sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2},$$

где U – напряжение, приложенное к цепи, В;
 y – полная проводимость цепи, $1/\text{Ом} = \text{См}$ (сименс);

$$g = \frac{R}{R^2 + (\omega L)^2} \text{ – активная проводимость ветви } R, L;$$

$$b_L = \frac{\omega L}{R^2 + (\omega L)^2} \text{ – индуктивная проводимость ветви } R, L;$$

$$b_C = \omega C \text{ – емкостная проводимость ветви с конденсатором.}$$

Изменяя индуктивность L , емкость C , сопротивление R или частоту питающего напряжения, можно добиться того, что b_L будет равняться b_C , и тогда общий ток $I = Ug$ становится чисто активным. Это соответствует режиму резонанса. Следовательно, условие резонанса токов можно записать как $b_L = b_C$ или

$$\frac{\omega'_p L}{R^2 + (\omega L)^2} = \omega'_p C,$$

откуда резонансная частота

$$\omega'_p = \frac{1}{\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{L/C - R^2}{L/C}} \approx \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_p,$$

где ω'_p – резонансная частота параллельного контура;

ω_p – резонансная частота последовательного контура.

В частном случае, когда можно пренебречь активным сопротивлением катушки индуктивности, условием резонанса становится равенство $\frac{1}{\omega L} = \omega C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. В этом частном случае ток в неразветвленной части цепи равен нулю. Это значит, что притока энергии извне нет, но в замкнутом контуре, образуемом двумя ветвями, ток проходит. В этом контуре происходит непрерывное превращение энергии электрического поля, запасенного конденсатором, в энергию магнитного поля, запасенную катушкой, и обратно.

Для реального контура, обладающего активным сопротивлением R (сопротивление соединительных проводов, активное сопротивление катушки индуктивности $R_L = \frac{U_L}{I} \sin \varphi$), протекание тока будет сопровождаться, кроме обратимого обмена энергией, также необратимым преобразованием электрической энергии в другие виды энергии (тепловую, лучевую, механическую, химическую).

С этими процессами напрямую связаны мощности цепи синусоидального тока, так как коэффициент мощности

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

где $P = UI \cos \varphi = I^2 R = U^2 g$ – активная мощность, Вт;

$S = UI = \sqrt{P^2 + Q^2}$ – полная мощность, ВА;

$Q = UI \sin \varphi = I^2 X = U^2 b$ – реактивная мощность, ВАр.

Поскольку $b = b_L - b_C$, то $Q = U^2 (b_L - b_C) = U^2 b_L - U^2 b_C = Q_L - Q_C$.

Наряду с понятием активной мощности P и реактивной мощности Q применяется понятие полной мощности

$$S = UI.$$

Полная, активная и реактивная мощности образуют так называемый треугольник мощностей (рис. 3.3).

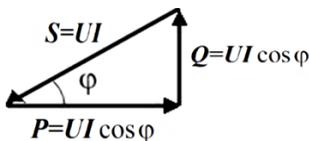


Рис. 3.3. Треугольник мощностей

Как видно из треугольника мощностей, при снижении реактивной мощности до нуля полная мощность становится равна активной мощности, угол φ уменьшается до нуля.

Для компенсации индуктивной составляющей реактивной мощности Q_L параллельно нагрузке включают конденсаторы. При этом, подбирая емкость конденсатора, можно добиться приближенной компенсации реактивной мощности потребителей электрической энергии, т. е. обеспечить $Q_L - Q_C \rightarrow 0$.

Повышение коэффициента мощности $\cos \varphi$ используется в электро-снабжении.

Большинство потребителей электроэнергии являются активно-индуктивной нагрузкой, что приводит к уменьшению коэффициента мощности. Параллельное подключение конденсатора приводит к уменьшению тока в подводящих проводах при неизменной активной мощности. При этом уменьшаются потери в линиях электро-передачи, которые пропорциональны квадрату тока:

$$\Delta P_{\text{л}} = I^2 R = \frac{P^2}{U^2 (\cos \varphi)^2} R_{\text{л}}.$$

Аналогично снижаются потери в обмотках генераторов и трансформаторов, снабжающих электростанции, и трансформаторных подстанций.

Емкость, необходимую для повышения коэффициента мощности до требуемого значения, можно определить по формуле

$$C = \frac{P}{U^2 \omega} (\operatorname{tg} \varphi_{\text{н}} - \operatorname{tg} \varphi_{\text{к}}),$$

где $\varphi_{\text{н}}$, $\varphi_{\text{к}}$ – угол сдвига фаз между напряжением и током до компенсации и после компенсации соответственно;

$P = UI_n \cos \varphi_n$ – активная мощность, потребляемая нагрузкой;
 $\omega = 2\pi f$ – частота синусоидального тока.

Программа работы и порядок ее выполнения

Опыт 1. Исследовать явление резонанса токов в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора

1. Ознакомиться с оборудованием рабочего места и измерительными приборами, используемыми при выполнении работы.
2. Собрать электрическую цепь согласно электрической схеме, представленной на рис. 3.4.

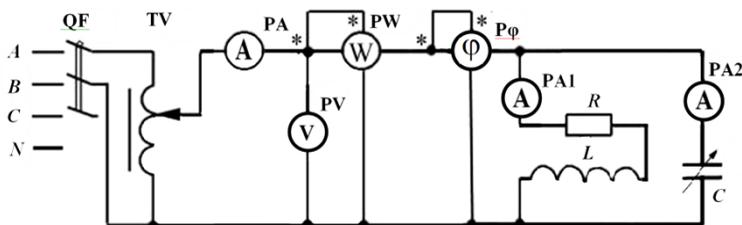


Рис. 3.4. Схема лабораторной установки

3. При помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТр) установить на входе электрической цепи напряжение $U = 100$ В и поддерживать его во время опыта неизменным. Не производя записей результатов измерений, убедиться, что при изменении емкости конденсатора от нуля до наибольшего возможного значения общий ток сначала убывает, а затем начинает возрастать. Такое же изменение угла φ будет при этом наблюдаться на фазометре. Эти явления свидетельствуют о возможности увеличения коэффициента мощности нагрузки, а, следовательно, и коэффициента полезного действия цепи путем параллельного подключения конденсатора C к катушке индуктивности, используемой в виде нагрузки.
4. Изменяя соответствующими переключателями на лабораторном стенде величину емкости конденсатора исследуемой цепи от 5 мкФ до наибольшего ее значения, произвести не менее пяти измерений. При этом обязательно найти резонанс токов, до резонанса выполнить

два измерения и после резонанса осуществить не менее двух измерений. Результаты измерений занести в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Результаты исследования цепи с параллельным соединением элементов $R-L, C$

Измерено							Вычислено					
$C,$ мкФ	$U,$ В	$I,$ А	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$\varphi,$ °	$\cos \varphi$	$S,$ ВА	$P,$ Вт	$Q,$ Вар	$b_C,$ См	$b_L,$ См	$g,$ См

Вычислить величины S, P, Q, b_C, b_L, g и результаты занести в табл. 3.1. При вычислениях можно использовать следующие формулы:

– полная мощность электрической цепи

$$S = UI;$$

– активная и реактивная мощности цепи

$$P = U I \cos \varphi; Q = U I \sin \varphi;$$

– реактивная составляющая проводимости емкостной ветви

$$b_c = \frac{I_2}{U}, \text{ см}$$

(активной составляющей проводимости емкостной ветви можно практически пренебречь);

– реактивная составляющая проводимости индуктивной ветви b_L и активная составляющая проводимости этой ветви g связаны между собой зависимостью:

$$y_1 = \sqrt{g_1^2 + b_L^2},$$

где y_1 – полная проводимость индуктивной ветви.

Отсюда $b_L = \sqrt{y_1^2 - g_1^2}.$

Значение полной проводимости индуктивной ветви y_1 можно определить из очевидной зависимости: $y_1 = \frac{I_1}{U}$.

Учитывая, что мы пренебрегали активной составляющей проводимости емкостной ветви и считаем имеющей активную составляющую проводимости только индуктивную ветвь, появляется возможность воспользоваться равенством: $g \approx g_1$, где g – активная составляющая проводимости цепи двух параллельных ветвей.

Дальнейшее определение g_1 не составляет труда, так как известно, что активная составляющая проводимости цепи и активная составляющая потребляемой мощности связаны зависимостью

$$P = gU^2.$$

Отсюда $g = g_1 = \frac{P}{U^2}$.

Опыт 2. Компенсация реактивной мощности

1. Отключить конденсаторы, оставив в схеме только активно-индуктивную нагрузку.

2. При помощи лабораторного автотрансформатора (ЛАТр) установить на входе электрической цепи напряжение $U = 100$ В. Произвести измерения, необходимые для заполнения первой строки табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты опыта компенсации реактивной мощности

Режимы	U , В	I , А	I_1 , А	I_2 , А	P , Вт	Q , Вар	$\cos \varphi$	φ , °	C , мкФ
До компенсации									
После компенсации									

3. Вычислить реактивную мощность Q и значение емкости конденсатора C , необходимое для ее компенсации до уровня, указанного преподавателем.

4. Набрать на батарее конденсаторов необходимую емкость и произвести компенсацию реактивной мощности. Данные внести в табл. 3.2.

5. Сравнить результаты измерений, полученные до и после компенсации (включения конденсатора в цепь). Сделать выводы.

Обработка результатов:

1. Построить векторные диаграммы токов и напряжения, отвечающих дорезонансному, резонансному и послерезонансному режимам цепи.

2. Построить графики изменения I , I_1 , I_2 , $\cos\varphi$ в зависимости от изменения емкости конденсатора C (построение всех графиков произвести в одной координатной системе).

3. Построить векторные диаграммы и треугольники мощностей до и после компенсации реактивной мощности.

Содержание отчета:

1. Название и цель работы.

2. Конспективная запись изученного теоретического материала в соответствии с программой работы.

3. Схемы исследований и таблица экспериментальных и расчетных данных.

4. Векторные диаграммы токов и напряжений.

5. Графики опытных и расчетных зависимостей, полученных в работе.

6. Основные выводы по результатам работы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Что понимается под резонансом токов и как его можно достигнуть в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности и конденсатора?

2. Условия возникновения и признаки резонанса токов.

3. Чему равен коэффициент усиления по току при резонансе?

4. Практическое применение резонанса токов.

5. Что такое коэффициент мощности и как его можно определить, каково его практическое значение?

6. Какие различают виды мощности в электрических цепях переменного тока?

Лабораторная работа № 4
ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ. СОЕДИНЕНИЕ НАГРУЗКИ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы: исследовать трехфазную цепь с нагрузкой, соединенной по схеме «звезда» с нейтральным и без нейтрального проводов.

Общие сведения из теории

Трехфазной цепью синусоидального тока называют совокупность трех однофазных цепей, в каждой из которых действуют синусоидальные ЭДС одинаковой амплитуды и частоты, но имеющие сдвиг по фазе относительно друг друга на угол 120° .

Источником электрической энергии в трехфазной цепи является синхронный генератор, имеющий три одинаковые обмотки (фазы), сдвинутые в пространстве на угол 120° , расположенные на статоре. Начала обмоток фаз обозначают A, B, C , концы – X, Y, Z соответственно. При вращении ротора, который представляет собой электромагнит постоянного тока, в обмотках статора будут индуцироваться переменные ЭДС, сдвинутые относительно друг друга по фазе на 120° ($2\pi/3$).

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin(\omega t) \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C = E_m \sin(\omega t + 120^\circ), \end{cases}$$

где E_m – амплитудное значение ЭДС фаз генератора.

Если ЭДС трех фаз равны по амплитуде и сдвинуты по фазе на угол 120° , то такую систему называют симметричной трехфазной системой.

Для источников и приемников трехфазной цепи существуют две схемы соединений: звездой и треугольником.

Трехфазная цепь с нейтральным проводом

При соединении генератора звездой концы обмоток генератора объединяют в общую точку, называемую нейтральной, обозначают ее буквой N (рис. 4.1).

При соединении трехфазного потребителя звездой концы фаз потребителя объединяют в общую точку, называемую нейтральной точкой нагрузки, и обозначают N_l (см. рис. 4.1).

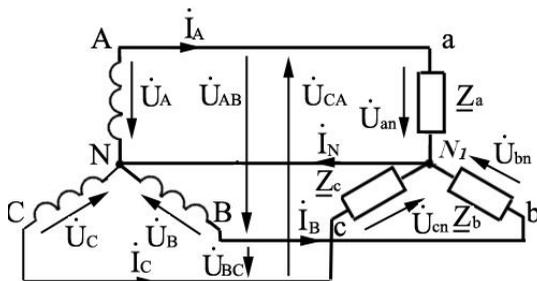


Рис. 4.1. Схема трехфазной цепи «звезда–звезда» с нейтральным проводом

Начала фаз потребителя и генератора объединяют проводами, называемыми линейными. Провод, соединяющий нейтральные точки генератора и потребителя, называют нейтральным. Полученную схему (рис. 4.1) называют «звезда–звезда» с нейтральным проводом (четырёхпроводная трехфазная).

Токи, протекающие по линейным проводам, называют линейными токами и обозначают I_A, I_B, I_C или I_l . За положительное направление условно принимают направление от генератора к нагрузке.

Ток, протекающий по нейтральному проводу, обозначают I_N . Его положительное направление принято от нагрузки к генератору (от точки N к точке n).

Напряжение между линейными проводами (между началом фаз) называют линейным, обозначают при помощи двух индексов: $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}, \dot{U}_{CA}$ (см. рис. 4.1).

Напряжение между нейтральной точкой и концом фазы называют фазным. Обозначают фазное напряжение генератора – $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$, фазное напряжение потребителя – $\dot{U}_{AN1}, \dot{U}_{BN1}, \dot{U}_{CN1}$. $\underline{Z}_A, \underline{Z}_B, \underline{Z}_C$ обозначили всю совокупность комплексного сопротивления потребителей, включенных в каждую фазу. Потребители определяют фазные токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$. Из схемы (см. рис. 4.1) видно, что при соединении потребителя по схеме «звезда» линейные токи равны фазным токам, т. е. $I_l = I_\phi$.

Согласно первому закону Кирхгофа, $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = \dot{I}_N$.

Сопروتивления линейных проводов и нейтрального провода малы, и ими можно пренебречь. Тогда линейные напряжения генератора примерно равны линейным напряжениям потребителей.

Согласно второму закону Кирхгофа,

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

т. е. линейное напряжение равно векторной разности соответствующих фазных напряжений.

Для симметричного источника векторная диаграмма напряжений имеет вид, как на рис. 4.2, *а*.

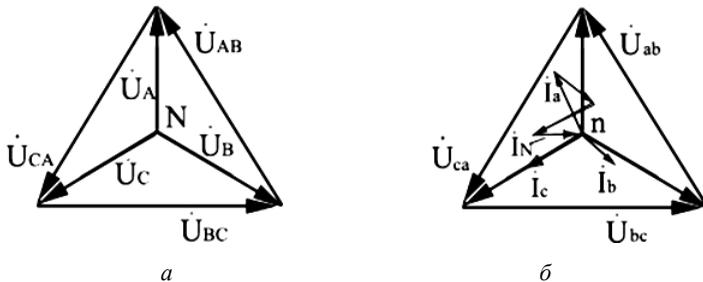


Рис. 4.2. Векторные диаграммы:

а – напряжений генератора; *б* – напряжений и токов потребителя

Из векторной диаграммы следует, что $U_L = \sqrt{3} U_\phi$.

При анализе режима работы трехфазной цепи исходим из того, что трехфазный источник является симметричным. Следовательно, при принятом предположении о сопротивлениях линейных и нейтрального проводов система фазных напряжений потребителя при соединении «звезда» с нейтральным проводом симметрична, поэтому

$$\dot{U}_A \approx \dot{U}_{AN1}, \quad \dot{U}_B \approx \dot{U}_{BN1}, \quad \dot{U}_C \approx \dot{U}_{CN1}.$$

С учетом сказанного векторная диаграмма напряжений приемника будет иметь такой же вид (рис. 4.2, *б*), т. е. точки нейтрали генератора и приемника совпадут, и напряжение между нейтральными генератора и потребителя $U_{NN1} = 0$.

Фазные токи зависят от суммарного сопротивления всех потребителей данной фазы. По направлению они могут совпадать со своим напряжением (нагрузка чисто активная), опережать свое напряжение (нагрузка активно-емкостная) и отставать от своего напряжения (нагрузка активно-индуктивная). Векторная сумма фазных токов равна току нейтрального провода \dot{I}_N (рис. 4.2).

Таким образом, нейтральный провод обеспечивает независимую работу потребителей в разных фазах. Например, потребители в одной из фаз можно выключить (обрыв фазы) или сделать короткое замыкание (аварийный режим), в других двух фазах напряжение останется номинальное, т. е. то, которое и было, то, на которое рассчитан потребитель.

Нагрузка, при которой все комплексные сопротивления фаз равны между собой: $\underline{Z}_A = \underline{Z}_B = \underline{Z}_C$, – называется симметричной.

При симметричной нагрузке фазные токи тоже должны быть равны между собой и сдвинуты относительно друг друга по фазе на 120° . В связи с этим векторная сумма токов должна быть равна нулю, и необходимость нейтрального провода отпадает.

Трехфазная цепь без нейтрального провода. Несимметричный режим

В случае отключения или выхода из строя нейтрального провода при несимметричной нагрузке фазные напряжения оказываются неравными друг другу, происходит так называемый «перекос фаз».

Причина в следующем: в трехпроводной трехфазной цепи при любом режиме нагрузки векторная сумма фазных токов равна нулю, т. е.

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

При изменении сопротивления хотя бы в одной из фаз изменится величина соответствующего тока. А это приведет к изменению и остальных фазных токов согласно первому закону Кирхгофа. Согласно закону Ома ($\dot{U} = \dot{I}\underline{Z}$) изменяются и напряжения, т. е. фазные напряжения на потребителе станут разными, отличными от номинальных. Между нейтральными точками генератора и потребителя появляется напряжение, называемое напряжением смещения нейтрали ($\dot{U}_{N,N}$).

На основании второго закона Кирхгофа фазные напряжения на потребителе будут равны векторной разности соответствующих фазных напряжений генератора и напряжения смещения нейтрали, т. е.

$$\begin{aligned}\dot{U}_{AN_1} &= \dot{U}_A - \dot{U}_{N_1N}; \\ \dot{U}_{BN_1} &= \dot{U}_B - \dot{U}_{N_1N}; \\ \dot{U}_{CN_1} &= \dot{U}_C - \dot{U}_{N_1N}.\end{aligned}$$

Векторная диаграмма для случая несимметричной нагрузки при соединении потребителя по схеме «звезда» без нейтрального провода представлена на рис. 4.3.

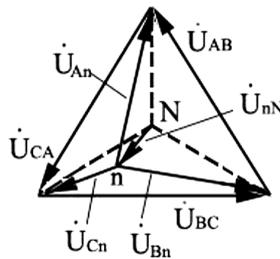


Рис. 4.3. Векторная диаграмма напряжений несимметричного режима работы цепи при соединении нагрузок звездой

В связи с вышеизложенным соединение потребителей по схеме «звезда» без нейтрального провода используется лишь в том случае, если трехфазная нагрузка симметричная.

Мощность в трехфазной цепи

Мощности трехфазного потребителя в общем случае можно определить как сумму мощностей всех фаз. При соединении приемников звездой активная, реактивная и полная мощности определяются по формулам:

$$\begin{aligned}P &= P_A + P_B + P_C = U_A I_A \cos \varphi_A + U_B I_B \cos \varphi_B + U_C I_C \cos \varphi_C, \\ Q &= Q_A + Q_B + Q_C = U_A I_A \sin \varphi_A + U_B I_B \sin \varphi_B + U_C I_C \sin \varphi_C, \\ S &= \sqrt{P^2 + Q^2}.\end{aligned}$$

При симметричной нагрузке эти формулы упрощаются и записываются следующим образом:

$$P = 3P_{\Phi} = 3U_{\Phi}I_{\Phi} \cos \varphi = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \cos \varphi,$$

$$Q = 3Q_{\Phi} = 3U_{\Phi}I_{\Phi} \sin \varphi = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л} \sin \varphi,$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = 3S_{\Phi} = 3U_{\Phi}I_{\Phi} = \sqrt{3}U_{Л}I_{Л}.$$

Непосредственно измерить активную мощность трехфазной нагрузки можно с помощью трех ваттметров, включенных в каждую фазу (метод трех ваттметров) или с помощью двух ваттметров, включенных по току в две фазы и использующих линейное напряжение.

Программа работы и порядок ее выполнения

Опыт 1. Трехфазная цепь с нейтральным проводом

1. Собрать цепь, согласно рис. 4.4, используя приборы и элементы лабораторного стенда.

2. В данной электрической схеме PA_A, PA_B, PA_C, PA_N – амперметры на предел 1А, 2А; PV – вольтметр, предел 250 В; Z_A, Z_B, Z_C – переменные сопротивления трехфазной нагрузки.

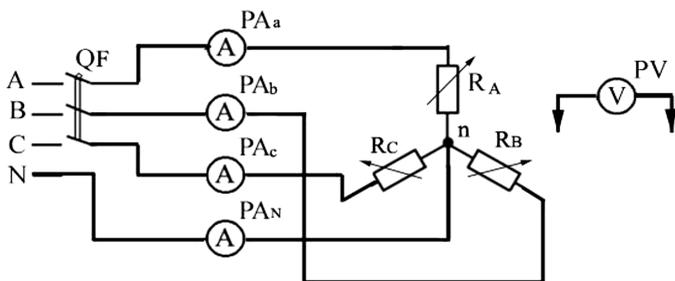


Рис. 4.4. Схема экспериментальной установки: соединение нагрузок звездой с нейтральным проводом

3. С помощью переключателей нагрузки установить симметричный режим, подать напряжение, произвести измерения линейных

токов и тока в нейтральном проводе, фазных и линейных напряжений. Для измерения напряжения использовать вольтметр стенда, поочередно подключая его к соответствующим точкам цепи. Результаты измерений записать в табл. 4.1.

4. Создать несимметричный режим работы трехфазной цепи, произвести измерение фазных токов и тока в нейтральном проводе, фазных и линейных напряжений. Результаты измерения занести в табл. 4.1.

5. Установить режим обрыва (отключения потребителей) фазы А. Произвести необходимые измерения токов и напряжений. Результаты свести в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Результаты исследования трехфазной цепи
с соединением нагрузок звездой с нейтральным проводом

Режим работы цепи	Измерено									Вычислено			
	U_{AB} В	U_{BC} В	U_{CA} В	U_{AN1} В	U_{BN1} В	U_{CN1} В	I_A А	I_B А	I_C А	I_N А	$\frac{U_{AB}}{U_{AN1}}$	$\frac{U_{BC}}{U_{BN1}}$	$\frac{U_{CA}}{U_{CN1}}$
Симметричный (3 резистора в каждой фазе)													
Несимметричный (1 резистор в фазе А, 2 резистора в фазе В, 3 резистора в фазе С)													
Обрыв фазы (выключить все резисторы в фазе А, включить по 3 резистора в фазах В и С)													

Опыт 2. Трехфазная цепь без нейтрального провода

Исследовать четырехпроводную цепь при соединении потребителей по схеме «звезда» без нейтрального провода в различных режимах работы:

1. Отключить цепь от источника питания, снять нейтральный провод.

2. Подключить цепь к источнику питания. С помощью переключателя нагрузки установить симметричный режим. Произвести

измерение фазных токов, фазных и линейных напряжений и напряжения смещения нейтрали, результаты занести в табл. 4.2.

3. Установить несимметричный режим, произвести измерения токов и напряжений. Результаты занести в табл. 4.2.

4. Установить режим обрыва (отключения потребителей) фазы А. Произвести необходимые измерения. Результаты занести в табл. 4.2.

5. Отключить цепь от источника питания. Проводником замкнуть клеммы входа потребителя из фазы А. Подать напряжение на цепь. Произвести необходимые измерения. Результаты занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Результаты исследования трехфазной цепи с соединением нагрузок звездой без нейтрального провода

Режим работы цепи	Измерено										Вычислено		
	U_{AB} В	U_{BC} В	U_{CA} В	U_{AN} В	U_{BN} В	U_{CN} В	I_A А	I_B А	I_C А	U_{NIN} В	$\frac{U_{AB}}{U_{AN}}$	$\frac{U_{BC}}{U_{BN}}$	$\frac{U_{CA}}{U_{CN}}$
Симметричный (3 резистора в каждой фазе)													
Несимметричный (1 резистор в фазе А, 2 резистора в фазе В, 3 резистора в фазе С)													
Обрыв фазы (выключить все резисторы в фазе А, включить по 3 резистора в фазах В и С)													
Короткое замыкание фазы А (выполняется под руководством преподавателя или лаборанта)													

Обработка результатов измерений:

1. Определить соотношения между фазными и линейными значениями напряжений.

2. По данным измерений построить векторные диаграммы токов и напряжений для всех исследуемых режимов работы цепи.

3. Построение векторных диаграмм для всех случаев следует начинать с симметричной системы фазных и линейных напряжений генератора, как это показано на рис. 4.2, выбрав при этом соответствующий масштаб.

4. При наличии нейтрального провода точки N и N_1 на диаграмме будут совпадать, так как потенциалы этих точек совпадают.

5. При отсутствии нейтрального провода положение точки N_1 на диаграмме в общем случае нужно искать методом засечек. Из вершины A проводится окружность радиусом U_{AN_1} , из вершины B – радиусом U_{BN_1} , и из вершины C – радиусом U_{CN_1} . Точка пересечения окружностей есть точка n . Ее соединяют с точками A , B , C (рис. 4.3) и получают векторы фазных напряжений потребителя.

6. Векторы токов строят по отношению к соответствующим векторам фазных напряжений с учетом угла сдвига фаз, который определяется нагрузкой (для активной нагрузки R сдвиг фаз между током и напряжением $\varphi_R = 0$).

Содержание отчета:

1. Название и цель работы.
2. Конспективная запись изучения теоретического материала.
3. Программа работы, соответствующие схемы и таблицы экспериментальных и расчетных данных.
4. Векторные диаграммы токов и напряжений для исследуемых режимов.
5. Выводы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Что называется трехфазной цепью синусоидального тока?
2. Схемы, основные соотношения, достоинства и недостатки при соединении потребителей (приемников) в трехфазных цепях по схеме «звезда» с нейтральным проводом и без нейтрального провода.
3. Симметричная и несимметричная нагрузка в трехфазных цепях.
4. Назначение нейтрального провода. Как можно определить ток в нейтральном проводе?
5. Как связаны линейные токи и напряжения с их фазными значениями в трехфазной цепи при соединении приемников по схеме «звезда»?
6. Активная, реактивная и полная мощности в трехфазных цепях синусоидального тока.

Лабораторная работа № 5
**ТРЕХФАЗНАЯ ЦЕПЬ. СОЕДИНЕНИЕ НАГРУЗКИ
ТРЕУГОЛЬНИКОМ**

Цели работы: 1) исследовать трехфазную цепь с нагрузкой, соединенной по схеме «треугольник» в симметричном и несимметричном режимах; 2) определить основные соотношения между фазными и линейными значениями токов и напряжений.

Общие сведения из теории

При соединении трехфазного потребителя по схеме «треугольник» конец потребителя в первой фазе соединяется с началом потребителя во второй фазе (точка b на рис. 5.1), конец потребителя во второй фазе соединяется с началом потребителя в третьей фазе (точка c) и конец потребителя в третьей фазе соединяется с началом потребителя в первой фазе (точка a). Получается треугольник с вершинами в точках a, b, c .

Необходимо иметь в виду, что схема включения потребителя не зависит от схемы включения источника (генератора). Обмотки генератора (источника) чаще всего включаются по схеме «звезда». Такая схема и ее векторная диаграмма рассмотрены в предыдущей работе, а здесь отметим, что линейные провода соединяют клеммы источника A, B, C с соответствующими клеммами потребителя a, b, c (см. рис. 5.1).

На рис. 5.1 видно, что каждая фаза потребителя присоединяется соответственно к двум линейным проводам. Поэтому при соединении потребителей по схеме «треугольник» фазные напряжения равны соответствующим линейным напряжениям:

$$\dot{U}_{AB} = \dot{U}_{ab}; \dot{U}_{BC} = \dot{U}_{bc}; \dot{U}_{CA} = \dot{U}_{ca}.$$

Фазные токи, которые, как и напряжения, обозначаются двойным индексом, можно определить из закона Ома для участка цепи, а именно:

$$\dot{I}_{ab} = \frac{\dot{U}_{ab}}{\underline{Z}_{ab}} \quad \dot{I}_{bc} = \frac{\dot{U}_{bc}}{\underline{Z}_{bc}} \quad \dot{I}_{ca} = \frac{\dot{U}_{ca}}{\underline{Z}_{ca}}.$$

Отсюда видно, что токи в каждой фазе зависят только от своих линейных напряжений и сопротивлений своих фаз. Следовательно, независимую работу потребителей в такой схеме может обеспечить трехпроводная линия электропередачи. Это является преимуществом схемы «треугольник», т. к. независимую работу потребителей в схеме «звезда» может обеспечить четырехпроводная линия («звезда» с нейтральным проводом). Недостатком схемы «треугольник» является то, что у потребителя будет только одно напряжение – линейное.

На основании первого закона Кирхгофа для узлов a , b , c потребителя можно записать выражения для линейных токов:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{ab} - \dot{I}_{ca} \quad \dot{I}_B = \dot{I}_{bc} - \dot{I}_{ab} \quad \dot{I}_C = \dot{I}_{ca} - \dot{I}_{bc}.$$

На схеме (рис. 5.1) условно принято: все линейные токи ориентированы от источника к потребителю, а все фазные токи – по часовой стрелке.

Допустим, сопротивления фаз разные и чисто активные: $R_{ab} \neq R_{bc} \neq R_{ca}$, поэтому фазные токи при одинаковых напряжениях будут разными. Векторная диаграмма напряжений и токов показана на рис. 5.2.

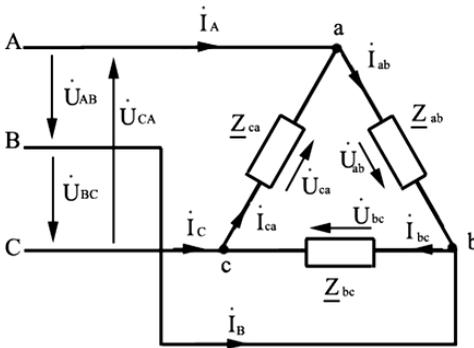


Рис. 5.1. Включение потребителей по схеме «треугольник»

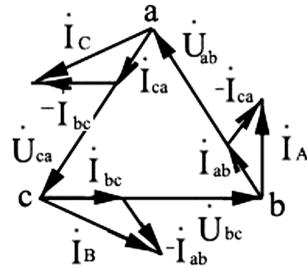


Рис. 5.2. Векторная диаграмма напряжений и токов при соединении потребителя треугольником

Если нагрузка будет симметричной, то треугольники токов становятся равнобедренными с одинаковыми фазными $I_{ab} = I_{bc} = I_{ca} = I_\phi$ и равными линейными токами $I_A = I_B = I_C = I_\Delta$, откуда следует, что $I_\Delta = \sqrt{3} I_\phi$.

Обрыв фазы потребителя при соединении треугольником следует рассматривать как выключение потребителя в этой фазе, и это есть частный случай несимметричной нагрузки. При обрыве линейного провода в трехфазной цепи с нагрузкой, включенной треугольником, трехфазная система токов исчезает. Это эквивалентно включению потребителя в однофазную цепь, и на векторной диаграмме треугольники исчезают.

Мощность при соединении треугольником

Мощности в трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником можно определить по известным формулам, приведенным в предыдущей работе, но токи, напряжения и угол сдвига фаз будут иметь индексы из двух букв.

Активная мощность

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

Реактивная мощность

$$Q = Q_{ab} + Q_{bc} + Q_{ca} = U_{ab} I_{ab} \sin \varphi_{ab} + U_{bc} I_{bc} \sin \varphi_{bc} + U_{ca} I_{ca} \sin \varphi_{ca}.$$

Полная мощность

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

Фазные мощности (P_{ab} , P_{bc} , P_{ca} , Q_{ab} , Q_{bc} , Q_{ca}) при симметричном режиме равны, поэтому в таком случае:

$$P = 3P_{\Phi} = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \cos \varphi_{\Phi} = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \cos \varphi_{Л};$$

$$Q = 3Q_{\Phi} = 3U_{\Phi} I_{\Phi} \sin \varphi_{\Phi} = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} \sin \varphi_{Л};$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}; \quad S = 3S_{\Phi} = 3U_{\Phi} I_{\Phi} = \sqrt{3} U_{Л} I_{Л} a.$$

Программа работы и методика ее выполнения

1. Исследовать трехфазную цепь при соединении потребителей электрической энергии треугольником в различных режимах:

а) собрать электрическую цепь согласно рис. 5.3, используя при этом элементы и электроизмерительные приборы лабораторного

стенда следующих пределов измерения: PA_A, PA_B, PA_C – амперметры для измерения линейных токов с пределом 2А; $PA_{ab}, PA_{bc}, PA_{ca}$ – амперметры для измерения фазных токов с пределом 1А; PV – вольтметр с пределом измерения 250, 300 В;

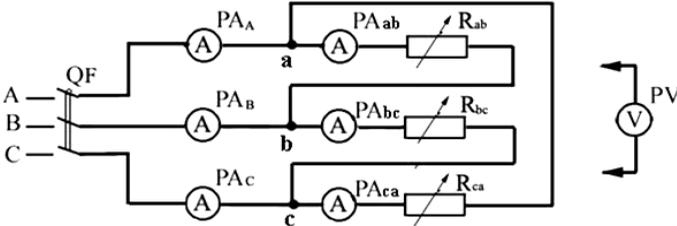


Рис. 5.3. Схема лабораторной установки

б) с помощью переключателей нагрузки установить симметричный режим, подать напряжение, произвести измерение линейных и фазных токов, напряжений. Все результаты измерений записывать в табл. 5.1;

Таблица 5.1

Результаты исследования трехфазной цепи с соединением нагрузок треугольником

Режим работы цепи	Измерено									Вычислено		
	U_{AB} В	U_{BC} В	U_{CA} В	I_A А	I_B А	I_C А	I_{ab} А	I_{bc} А	I_{ca} А	I_A/I_{ab}	I_B/I_{bc}	I_C/I_{ca}
Симметричный (3 резистора в каждой фазе)												
Несимметричный (1 резистор в фазе ab, 2 резистора в фазе bc, 3 резистора в фазе c)												
Обрыв фазы (выключить все резисторы в фазе ab, включить по 3 резистора в фазах bc и ca)												
Обрыв линейного провода (восстановить симметричный режим и снять линейный провод A)												

в) с помощью переключателей нагрузки установить несимметричный режим. Произвести измерения токов и напряжений;

г) установить режим обрыва фазы ab , для чего переключатели нагрузки данной фазы отключить. Произвести необходимые измерения токов и напряжений;

д) отключить напряжение. Снять линейный провод A . Переключателями нагрузки создать симметричный режим нагрузки. Подать напряжение.

Произвести необходимые измерения токов и напряжений. Результаты свести в табл. 5.1.

Обработка результатов измерений:

1. Определить соотношение между линейными и фазными токами для всех режимов. Результаты занести в табл. 5.1.

2. Для всех исследуемых режимов нагрузки построить векторные диаграммы токов и напряжений, приняв соответствующий масштаб по току и напряжению.

Содержание отчета:

1. Название и цель работы.
2. Конспективная запись теоретического материала.
3. Схема исследования.
4. Таблицы экспериментальных и расчетных данных.
5. Векторные диаграммы токов и напряжений для исследуемых режимов цепи.
6. Выводы по работе.

Вопросы для самоконтроля:

1. В каком случае используется соединение потребителей по схеме «треугольник»?
2. Схема включения, основные соотношения, векторные диаграммы при соединении трехфазного потребителя по схеме «треугольник».
3. Как изменится мощность потребления трехфазного потребителя при переключении его со схемы «звезда» на схему «треугольник» при том же линейном напряжении?
4. Как связаны линейные и фазные токи и напряжения при соединении трехфазного потребителя по схеме «треугольник»?
5. Активная, реактивная и полная мощности трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником.

Лабораторная работа № 6 **ИСПЫТАНИЕ ОДНОФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

Цели работы: 1) ознакомиться с устройством и принципом действия однофазного трансформатора; 2) провести испытание трансформатора в нагруженном режиме, режимах холостого хода и короткого замыкания.

Общие сведения из теории

Трансформатор – статическое электромагнитное устройство, предназначенное для преобразования переменного (синусоидального) напряжения (тока) одного значения в напряжение (ток) другого значения и той же частоты.

Принцип работы трансформатора

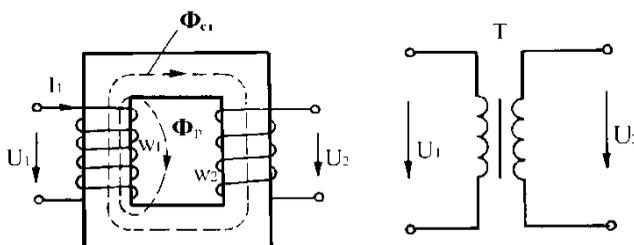


Рис. 6.1. Схема однофазного трансформатора

Простейший однофазный трансформатор представляет собой замкнутый сердечник из трансформаторной стали, на котором расположены магнитосвязанные и изолированные друг от друга обмотки. Обмотка, подключенная к источнику питания, называется первичной. Все электрические величины, связанные первичной обмоткой, называются первичными – первичные ЭДС (E_1), напряжение (U_1), ток (I_1), магнитный поток (Φ_1). Обмотки, соединенные с нагрузкой, называются вторичными. Электрические величины, связанные с вторичной обмоткой, называются вторичными (E_2 , U_2 , I_2 , Φ_2).

На первичную обмотку подают переменное напряжение U_1 , в результате в ней возникает переменный ток I_1 , который вызывает,

в свою очередь, магнитное поле. Магнитные силовые линии этого поля замыкаются по стальному сердечнику. При этом магнитными силовыми линиями проходят как через первичную, так и через вторичную обмотки. В первичной обмотке возникает ЭДС самоиндукции E_1 , во вторичной обмотке – ЭДС взаимной индукции E_2 . Действующее значение E_1 и E_2 можно определить по формулам:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m ;$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m ,$$

где f – частота питающего напряжения;

Φ_m – амплитудное значение магнитного потока в сердечнике;

w_1, w_2 – количество витков соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора.

Отношение напряжений в первичной и вторичной обмотках называют коэффициентом трансформации. Из формул следует, что коэффициент трансформации также равен отношению числа витков в первичной и вторичной обмотках:

$$k_T = \frac{E_2}{E_1} = \frac{w_2}{w_1} .$$

Различают три режима работы трансформатора – холостой ход, режим нагрузки и режим короткого замыкания.

Холостой ход

В режиме холостого хода, когда цепь вторичной обмотки разомкнута и ток в цепи вторичной обмотки отсутствует, напряжение на вторичной обмотке равно электродвижущей силе, а ЭДС в первичной обмотке практически равна напряжению на ней – $U_2 = E_2$ и $E_1 = U_1$. Следовательно, коэффициент трансформации можно рассчитать как отношение напряжений в обмотках:

$$k_T = \frac{E_2}{E_1} = \frac{U_2}{U_1} .$$

Потери в режиме холостого хода

В режиме холостого хода трансформатор не совершает никакой полезной работы, поэтому всю мощность, которую он потребляет, можно отнести к потерям. Поэтому включенный в цепь первичной обмотки ваттметр P_{W1} , измеряющий потребляемую трансформатором мощность, по существу измеряет мощность потерь на холостом ходу $P_{ХХ}$.

Физически эта мощность расходуется на два рода процессов:

- выделение тепла в первичной обмотке;
- потери энергии в сердечнике трансформатора.

Ток холостого хода в первичной обмотке мал, а мощность тепловыделения в ней пропорциональна квадрату тока. Поэтому мощность потерь «в меди» первичной обмотки незначительна и в практических расчетах приравнивается к нулю.

Таким образом, считается, что вся мощность холостого хода связана с потерями в сердечнике трансформатора за счет образования вихревых токов и перемагничивания стали магнитопровода. Эту величину называют «потери в стали».

$$P_{СТ} = P_{ХХ}.$$

Режим нагрузки

Режим нагрузки трансформатора реализуется при подключении к выводам вторичной обмотки некоторого потребителя. Важнейшей характеристикой возможностей трансформатора в нагруженном режиме является его внешняя характеристика – зависимость напряжения вторичной обмотки от тока во вторичной обмотке $U_2 = f(I_2)$.

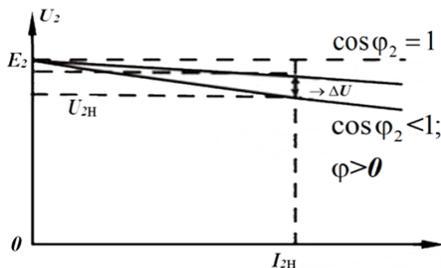


Рис. 6.2. Внешняя характеристика однофазного трансформатора

С увеличением тока нагрузки растет падение напряжения на внутреннем сопротивлении вторичной обмотки, следовательно, выходное напряжение вторичной обмотки уменьшается.

Режим короткого замыкания

В режиме короткого замыкания выводы вторичной обмотки замкнуты между собой, поэтому величина сопротивления нагрузки равна нулю. Различают режим короткого замыкания, возникший в аварийном порядке, грозящий трансформатору выходом из строя, и лабораторный режим короткого замыкания, используемый для определения некоторых параметров трансформатора.

Потери в лабораторном режиме короткого замыкания

В лабораторном режиме короткого замыкания на первичную обмотку подают небольшое напряжение (до 10 % номинального напряжения) так, чтобы во вторичной обмотке возник ток, равный номинальному $I_{2н}$. Таким образом, тепловыделение во вторичной обмотке, т. е. «потери в меди» $P_2 = I_{2н}^2 R$ равно тепловыделению при номинальном режиме.

При этом потери в стали невелики, поскольку невелико напряжение на первичной обмотке и, соответственно, магнитные поля в сердечнике. Поэтому ими можно пренебречь и считать, что показания ваттметра в лабораторном опыте короткого замыкания равны потерям в меди при номинальном токе вторичной обмотки.

$$P_{МН} = P_{1к}.$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

Коэффициент полезного действия трансформатора рассчитывается как отношение активных мощностей на выходе и входе трансформатора:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

Считая, что входная и выходная мощности различаются на величину потерь, запишем:

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

Ранее было показано, что общие потери в трансформаторе состоят из потерь в стали и потерь в меди:

$$\Delta P = P_{\text{СТ}} + P_{\text{М}}.$$

При этом потери в стали не зависят от нагрузки, а потери в меди зависят от тока во вторичной обмотке или коэффициента загрузки трансформатора β , который равен отношению тока во вторичной обмотке I_2 к его номинальному значению $I_{2\text{Н}}$. В настоящей работе номинальный ток вторичной обмотки – 2 А.

$$P_{\text{М}} = \beta^2 P_{\text{МК}}; \quad \beta = \frac{I_2}{I_{2\text{Н}}}.$$

Таким образом, коэффициент полезного действия трансформатора можно вычислить по формуле

$$\eta = \frac{(P_1 - (P_{\text{СТ}} + \beta^2 P_{\text{МК}}))}{P_1}.$$

Здесь P_1 – мощность на первичной обмотке трансформатора, которую можно определить непосредственным измерением с помощью ваттметра или вычислить по формуле

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1.$$

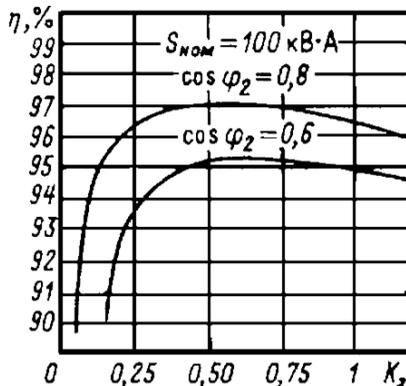


Рис. 6.3. Пример зависимость КПД трансформатора от коэффициента загрузки

Напомним, что потери в стали равны мощности, измеренной в опыте холостого хода, а потери в меди при номинальном токе нагрузки – в опыте лабораторного короткого замыкания.

Коэффициент полезного действия трансформатора – величина не постоянная, а зависящая от величины и характера нагрузки.

Программа работы и методика ее выполнения

Опыт холостого хода

После сборки схемы движок ЛАТРа установить в положение, соответствующее минимальному напряжению на входе трансформатора, включить рубильник питания лабораторного стола. Увеличить при помощи ЛАТРа напряжение на первичной обмотке исследуемого трансформатора до номинального значения $U_{1н} = 220 \text{ В}$.

Произвести измерение тока холостого хода в первичной обмотке трансформатора I_0 , мощности, потребляемой на холостом ходу P_0 , напряжения на выходе вторичной обмотки трансформатора U_2 , вычислить коэффициент трансформации k_T . Результаты измерений и расчетов занести в табл. 6.1.

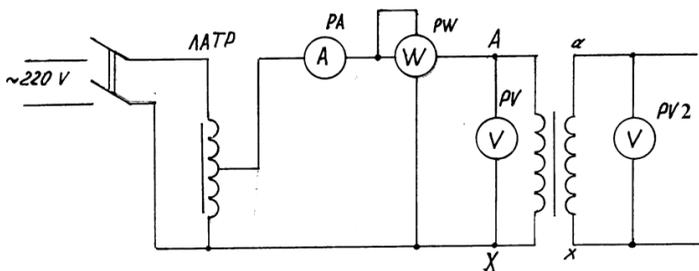


Рис. 6.4. Схема опыта холостого хода трансформатора

Таблица 6.1

Опыт холостого хода

Измерено				Вычислено
$U_{1н},$ В	$I_0,$ А	$P_0,$ Вт	$U_2,$ В	$k_T = \frac{U_2}{U_1}$

Опыт нагруженного режима

Для проведения опыта в нагруженном режиме работы трансформатора собрать схему, представленную на рис. 6.5. В цепь вторичной обмотки исследуемого трансформатора включается амперметр $PA2$ и переменное сопротивление нагрузки R_H . Роль переменного сопротивления нагрузки R_H играет ламповый реостат, позволяющий скачкообразно изменять ток.

При помощи ЛАТРa устанавливается на первичной обмотке трансформатора номинальное значение напряжения $U_{1H} = 220$ В.

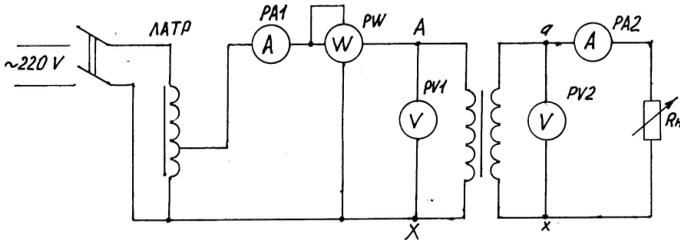


Рис. 6.5. Схема опыта нагруженного режима трансформатора

Тумблерами включения нагрузки постепенно ток вторичной обмотки трансформатора доводится до номинального значения $I_1 = I_{1H} = 2$ А. При этом для каждого значения сопротивления нагрузки произвести необходимые измерения и занести в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Опыт нагруженного режима

R_H 1...n	Измерено					Вычислено				
	U_{1H} , В	I_1 , А	P_1 , Вт	U_2 , В	I_2 , А	β	P_m , Вт	ΔP , Вт	$P_2 = P_1 - \Delta P$, Вт	$\eta = \frac{P_2}{P_1}$
1										
2										
3										
4										
5										
6										
7										

Анализируя работу трансформатора под нагрузкой, следует обратить внимание, что его коэффициент полезного действия изменяется с ростом нагрузки, достигая максимального значения при номинальном режиме.

Опыт короткого замыкания

Внимание! Опыт короткого замыкания выполняется только в присутствии преподавателя или лаборанта.

Для проведения опыта нужно собрать схему (рис. 6.6).

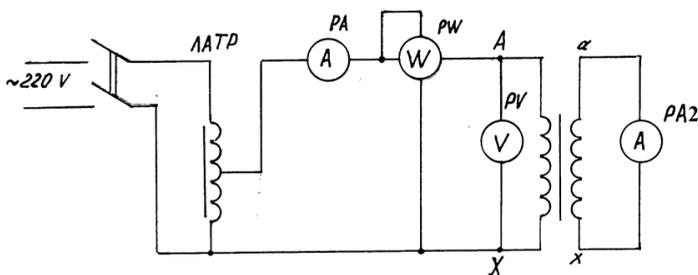


Рис. 6.6. Схема опыта короткого замыкания трансформатора

После сборки схемы необходимо убедиться, что движок ЛАТРа установлен в положение, соответствующее напряжению на входе трансформатора $U_1 = 0$, включить рубильник питания лабораторного стола. Плавно увеличить при помощи ЛАТРа напряжение на первичной обмотке исследуемого трансформатора до уровня, при котором ток во вторичной обмотке $I_2 = I_{2н} = 2$ А. Произвести измерения напряжения и тока в первичной обмотке трансформатора, мощности, потребляемой при лабораторном коротком замыкании, тока во вторичной обмотке трансформатора. Результаты измерений и расчетов занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Опыт лабораторного короткого замыкания

$U_{1к},$ В	$I_{1к},$ А	$P_{1к},$ Вт	$I_{2к} = I_{2н},$ А

Обработка результатов:

По данным табл. 6.2 строим зависимости при $U_1 = \text{const}$:

а) внешнюю характеристику трансформатора $U_2 = f(I_2)$;

б) характеристику КПД трансформатора $\eta = f(I_2)$.

При анализе полученных графических зависимостей обратить внимание на уменьшение выходного напряжения трансформатора с ростом нагрузки. Оценить процентное изменение напряжения на выходе исследуемого трансформатора при номинальной нагрузке относительно его значения при холостом ходе.

Содержание отчета:

1. Цель и программа работы.
2. Схемы электрические принципиальные лабораторных установок.
3. Таблицы опытных и расчетных данных.
4. Основные формулы, используемые при расчете.
5. Графики зависимости $U_2 = f(I_2)$ и $\eta = f(I_2)$ при $U_1 = \text{const}$.
6. Выводы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Почему при опыте холостого хода трансформатора пренебрегают потерями в проводах обмоток и считают, что показание включенного в цепь первичной обмотки ваттметра соответствует магнитным потерям в стали $R_{ст}$ сердечника трансформатора?

2. Почему при опыте короткого замыкания трансформатора пренебрегают потерями в стали и считают, что показание ваттметра соответствует потерям в меди?

3. В чем отличие опыта лабораторного короткого замыкания от аварийного короткого замыкания трансформатора?

4. Как практически определить коэффициент трансформации k_t трансформатора?

Лабораторная работа № 7

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОГО АСИНХРОННОГО ДВИГАТЕЛЯ С КОРОТКОЗАМКНУТЫМ РОТОРОМ

Цель работы: изучить устройство трехфазного асинхронного электродвигателя с короткозамкнутым ротором, научиться осуществлять его подключение, пуск и снятие рабочих характеристик.

Общие сведения из теории

Трехфазный асинхронный двигатель (ТАД) состоит из двух основных частей – статора и ротора.

Устройство статора

Статор – неподвижная часть двигателя состоит из станины 1, сердечника 2, обмоток 3 (рис. 7.1, а), подшипниковых щитов, закрывающих машину с торцов, и клеммной коробки, куда выводятся начала и концы обмоток и куда подключается питающая двигатель сеть.

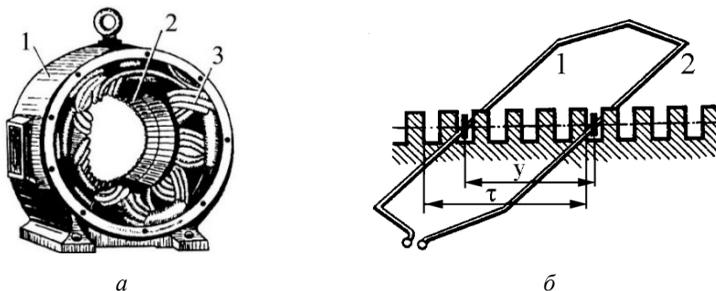


Рис. 7.1. Статор асинхронного двигателя (а) и размещение обмоток в пазах (б)

Станина выполняется литой из чугуна, стали, алюминия или сплавов легких металлов – для маломощных двигателей. Для лучшего охлаждения внешняя поверхность станины иногда делается ребристой. К станине крепятся все остальные элементы конструкции.

Для уменьшения вихревых токов сердечник статора (магнитопровод) набирается из отштампованных кольцеобразных листов электротехнической стали толщиной 0,35...0,5 мм. В машинах

большой мощности листы с обеих сторон покрываются изоляционным лаком или оксидной пленкой.

В пазы сердечника укладываются обмотки статора, чаще всего выполненные из медных изолированных проводов. Число обмоток у трехфазных машин делается кратным трем, следовательно, минимальное число обмоток – три. Начало и конец каждой обмотки маркируется и обозначается в соответствии с ГОСТ 26772–85. Например, начала трех обмоток обозначаются буквами A, B, C , и они в клеммной коробке крепятся к клеммам U_1, V_1, W_1 (рис. 7.2). Концы этих обмоток соответственно x, y, z и крепятся к клеммам U_2, V_2, W_2 .

Соединение обмоток звездой и треугольником

Схема соединения зависит от номинального напряжения, на которое рассчитаны обмотки, и от напряжения питающей сети. В паспортных данных двигателя указывается напряжение, на которое рассчитаны обмотки, например, $Y/\Delta 380V/220V$ означает, что при линейном напряжении 380 В обмотки надо соединять звездой, а при 220 В – треугольником (рис. 7.2, *a*) с помощью соответствующей установки перемычек.

В любом случае на каждой обмотке будет $U_{ном} = U_{\Phi} = 220$ В.

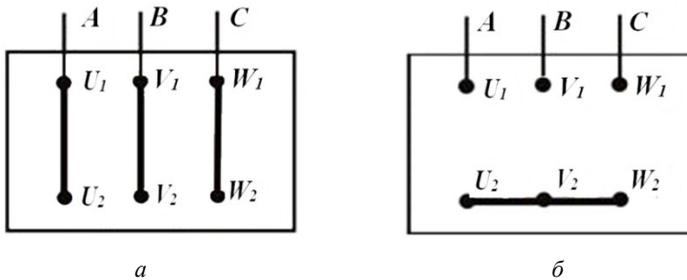


Рис. 7.2. Клеммная коробка ТАД при включении обмоток по схеме: *a* –треугольник; *б* –звезда

Устройство ротора

Ротор состоит из сердечника с обмотками и вала (рис. 7.3). Вал ротора вращается в подшипниках, расположенных в подшипниковых щитах. Сердечник ротора \mathcal{Z} , так же, как и статора, выполнен из листов

электротехнической стали для уменьшения влияния на работу вихревых токов. В этих листах выполняются пазы закрытого или полузакрытого типа для размещения проводников обмотки ротора. В зависимости от конструкции обмотки ротора различают силовые асинхронные двигатели с короткозамкнутыми и фазными роторами.

У двигателя с короткозамкнутым ротором продольные проводники обмотки 2 обычно выполнены в виде стержней и на торцах замкнуты накоротко 1 (рис. 7.3), образуя простую конструкцию ротора, электрически не связанного с внешними устройствами. Такой ротор, предложенный М. О. Доливо-Добровольским в 1891 году, называется беличьей клеткой или беличьим колесом. Обмотка ротора и короткозамыкающие кольца выполняются из меди или алюминия.

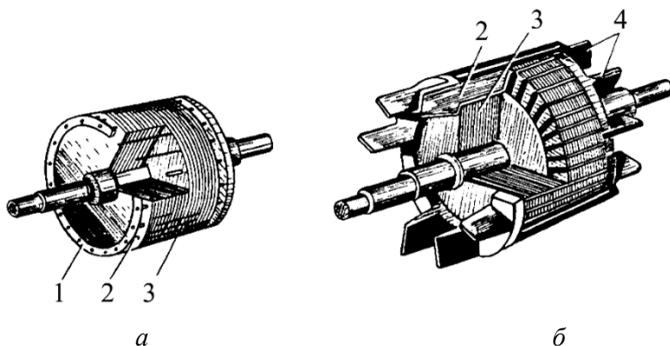


Рис. 7.3. Короткозамкнутые роторы асинхронного двигателя:
а – с медной; б – с алюминиевой обмоткой

Работа асинхронного двигателя

При включении обмоток статора в трехфазную сеть появляется вращающееся магнитное поле статора, под влиянием которого приводится во вращение ротор.

Вращающееся магнитное поле

Принцип получения вращающегося магнитного поля (ВМП) с помощью неподвижной системы проводников заключается в том, что по проводникам обмоток статора, геометрически сдвинутым на 120° , протекают токи, сдвинутые по фазе относительно друг друга

на углы 120° . В результате магнитное поле в статоре постоянно по величине и вращается с постоянной частотой [1].

Пусть в каждой фазной обмотке одна катушка, а в катушке – один виток. В этом случае в паз будет уложено по одному проводнику. Входной проводник фазы A будет уложен в паз A , а выходной проводник – в паз x (рис. 7.4). Входной проводник по фазе B будет сдвинут относительно A на угол 120° , а проводник третьей фазы C на 240° [3].

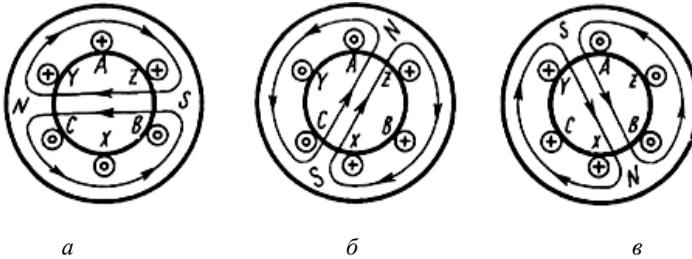


Рис. 7.4. Двухполюсное вращающееся магнитное поле (а, б, в)

Функции тока для каждой из фаз показаны на рис. 7.5.

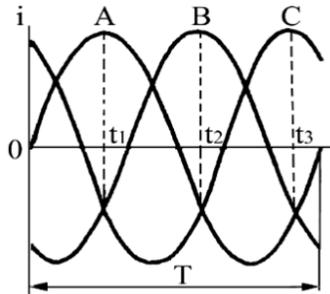


Рис. 7.5. Трехфазная система токов

Изображены результирующие магнитные поля статора для моментов времени t_1 , t_2 , t_3 .

В момент времени t_1 ток в фазе A положительный и максимальный. Условно примем, что такой ток по проводнику A течет от нас, и обозначим это крестиком. Ток по проводнику X будет ориентирован на нас – это отразим окружностью.

По фазам B и C в момент времени t_1 токи будут отрицательны, поэтому в начале обмоток в пазах B и C токи будут ориентированы на нас (круг), а в конце обмоток (пазы Y и Z) – от нас (крестик). Как видно из рис. 7.4, a , три проводника имеют одинаковую ориентацию токов, поэтому их магнитные поля объединяются и образуют двухполюсную систему.

Через $1/3$ периода трехфазных синусоидальных токов (рис. 7.5) в момент времени t_2 максимальным и положительным станет ток в фазе B , а в фазе A ток станет отрицательным. В фазе C ток, как и в момент времени t_1 , останется отрицательным. Поэтому в проводниках A, X, B, Y токи изменят свое направление, а в проводниках C и Z – не изменят. Отразив это соответствующей символикой, получим результирующее магнитное поле, повернутое на угол 120° по часовой стрелке (рис. 7.4, b). Еще через $1/3$ периода, в момент времени t_3 , положительным и максимальным будет ток в фазе C , а отрицательными токи в фазах A и B . Рассуждая аналогично предыдущим случаям, получим результирующее магнитное поле, повернутое еще на 120° (рис. 7.4, $b, в$). Таким образом, за период синусоидального тока ВМП совершит один оборот.

Если увеличить число катушек в каждой из обмоток и соединить их последовательно, то скорость вращения ВМП будет уменьшаться. Таким образом, скорость вращения ВМП прямо пропорциональна частоте питающей сети (f) и обратно пропорциональна числу пар полюсов (числу последовательно соединенных катушек каждой обмотки p) и определится формулой

$$n_1 = \frac{60f}{p}, \text{ об/мин.}$$

Максимальная частота вращения ВМП будет при $p = 1$, т. е. $n_{1\max} = 60f$ об/мин. Для питающей сети с $f = 50$ Гц $n_{1\max} = 3000$ об/мин.

Направление вращения ВМП определяется порядком следования фаз. При прямой последовательности фаз $A-B-C$ магнитное поле вращается по часовой стрелке. При обратной последовательности фаз, например $B-A-C$, – против часовой стрелки.

Вращение ротора Трехфазного Асинхронного Двигателя (ТАД)

Вращающееся магнитное поле статора пересекает проводники обмоток ротора и по закону электромагнитной индукции наводит в них ЭДС взаимной индукции, которая определяется по следующей формуле:

$$E = B l v,$$

где B – магнитная индукция поля статора;

l – длина проводника ротора;

v – скорость пересечения проводника ротора магнитными линиями.

Электродвижущая сила возникает в замкнутой обмотке, поэтому по ней потечет ток ротора. Следовательно, на обмотку начнет действовать сила, которая определяется по закону Ампера по формуле

$$F_1 = B I l_2,$$

где I_2 – сила тока, протекающего по проводнику ротора.

Направление этой силы совпадает с направлением вращения магнитного поля, а под действием пары сил появляется момент вращения ротора

$$M_{вр} = 2 F_1 N_2 \frac{D}{2},$$

где D – диаметр ротора;

N_2 – число проводников ротора.

Под действием момента сил ротор двигателя разгонится до некоторой скорости вращения n_2 , которая всегда принципиально меньше скорости вращения магнитного поля статора n_1 . Если допустить, что $n_1 = n_2$, то магнитное поле статора не будет пересекать проводники ротора, и момент станет равным нулю. Ввиду того, что у двигателя принципиально $n_1 > n_2$, такие электрические машины называются асинхронными (несинхронными), и их работа определяется параметром s – скольжение, который определяется по формуле

$$s = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

Откуда частота вращения ротора

$$n_2 = n_1(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s).$$

Регулировка скорости вращения ТАД

Исходя из приведенной формулы, частоту вращения двигателя можно регулировать следующими способами:

1) изменением частоты питающей сети f , например, с помощью преобразователей частоты;

2) изменением числа пар полюсов p , что можно осуществить коммутационным методом, переключением катушек фазных обмоток с последовательного соединения на параллельное и – наоборот;

3) изменением скольжения s , что осуществимо в двигателях с фазным ротором (изменением сопротивлений реостатов), а при короткозамкнутом роторе изменением питающего напряжения U_1 .

Все эти три способа требуют дополнительных затрат. Это является существенным недостатком асинхронных двигателей.

Рабочие характеристики двигателя

Свойства двигателя в рабочем режиме определяются рабочими характеристиками. Рабочие характеристики представляют следующие зависимости: потребляемой мощности P_1 ; потребляемого тока I_1 ; коэффициента мощности $\cos\varphi_1$; коэффициента полезного действия (КПД) η ; момента вращения $M_{вр}$; частоты вращения n_2 ; скольжения s от полезной мощности на валу двигателя P_2 при номинальном напряжении U_1 и постоянной частоте f питающей сети.

Рабочие характеристики определяются для области устойчивой работы, как правило, экспериментальным путем. Примерный вид рабочих характеристик показан на графиках (рис. 7.6).

Поясним некоторые рабочие характеристики. При $P_2 = 0$, момент вращения не равен нулю, т. к. на холостом ходу существуют потери энергии и $M_{вр} = M_{пот}$ (момент потерь).

Потребляемый из сети ток I_1 на холостом ходу имеет малую активную и большую реактивную составляющие. С ростом

нагрузки активный ток увеличивается и становится больше реактивного.

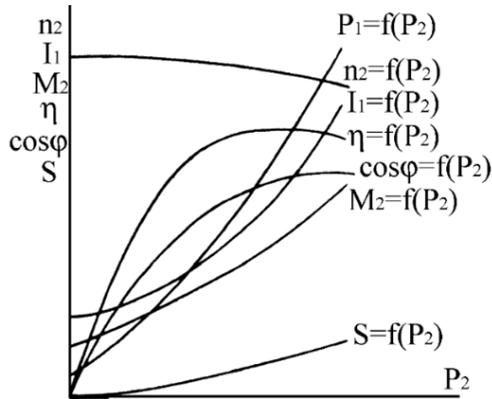


Рис. 7.6. Рабочие характеристики

Мощность и КПД асинхронного двигателя

Исходя из законов механики, полезная механическая мощность

$$P_2 = \omega_2 M, \text{ Вт,}$$

где $\omega_2 = \omega_2 = \frac{2\pi n_2}{60}$ – угловая скорость вращения, рад/с.

Активная потребляемая мощность P_1 на холостом ходу мала и расходуется на покрытие потерь механических и в магнито-проводе. Коэффициент мощности двигателя определяется по известной формуле – как отношение активной мощности к полной:

$$\cos \varphi_1 = \frac{P_1}{S_1} = \frac{P_1}{\sqrt{P_1^2 + Q_1^2}},$$

где S_1 , P_1 , Q_1 – полная, активная и реактивная мощности двигателя.

Коэффициент полезного действия (КПД) определяется, как обычно, отношением полезной мощности (механическая мощ-

ность на валу двигателя) P_2 к затраченной, т. е. потребляемой из сети P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{\omega_2 M}{\sqrt{3} U_1 I_1 \cos \varphi_1},$$

где U_1, I_1 – линейные напряжение и ток;

φ_1 – угол сдвига фаз между линейным напряжением и током.

Механическая характеристика двигателя

Механической характеристикой (МХ) двигателя называется зависимость частоты вращения от момента нагрузки на валу при постоянных значениях напряжения U_1 и частоты питающей сети f , т. е.

$$n_2 = f(M).$$

По существу, МХ является обратной зависимостью по отношению к зависимости момента вращения от скольжения, показанной на рис. 7.7, а.

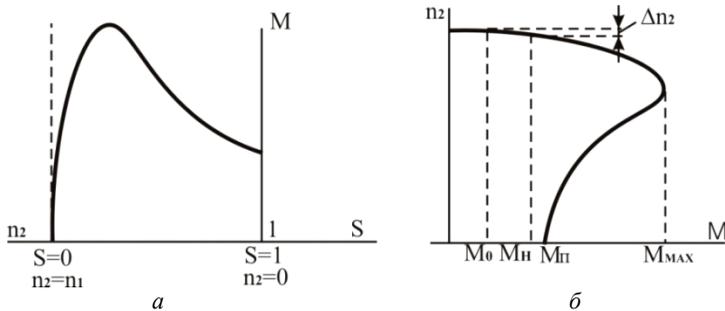


Рис. 7.7. Механическая характеристика ТАД

Видим, что при изменении момента нагрузки на валу от нуля до номинального ($0 < M < M_n$) скорость вращения изменяется всего лишь на несколько процентов от скорости вращения ВМП. Такая механическая характеристика считается жесткой. Это обусловлено тем, что скольжение s на холостом ходу двигателя около 1 %, а в номинальном режиме – 4–8 %.

Включение ТАД в однофазную сеть

ТАД также можно включать в однофазную сеть. Есть несколько схем включения ТАД в однофазную сеть. Одна из них показана на рис. 7.8, *a*, когда в одну из обмоток включается конденсатор.

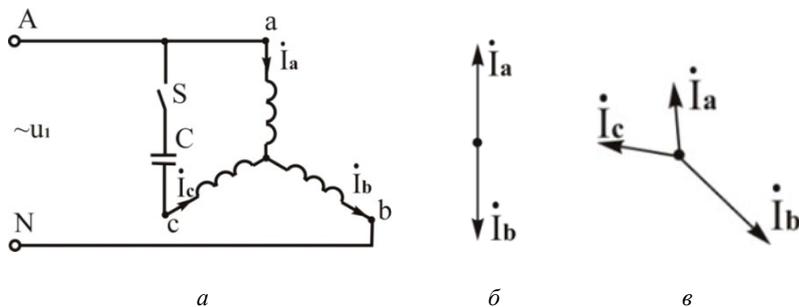


Рис. 7.8. Включение ТАД в однофазную сеть

При выключенном ключе S токи будут протекать только по обмоткам A и B , и векторная диаграмма токов будет соответствовать показанной на рис. 7.8, *б*. Такая система токов создает пульсирующее магнитное поле, которое не имеет пускового момента. Если ключ S включить, то в обмотку фазы C двигателя включается конденсатор, обеспечивающий фазовый сдвиг току \dot{I}_c относительно \dot{I}_a . В этом случае в соответствии с первым законом Кирхгофа для узла n (точка нейтрали двигателя)

$$\dot{I}_a + \dot{I}_c = \dot{I}_b = \dot{I}_N,$$

где \dot{I}_N – ток нейтрального провода.

Векторная диаграмма токов для этого случая, показанная на рис. 7.8, *в*, создает эллиптическое вращающееся магнитное поле (при вращении поток пульсирует), что вызывает уменьшение момента вращения. Мощность конденсаторного ТАД, включенного в однофазную сеть, составляет 70–80 % от мощности при его включении в трехфазную сеть. Однако при этом сильно увеличиваются токи в обмотках. Здесь также целесообразно использовать рабочие (C_p) и пусковые (C_n) конденсаторы.

Программа работы и методика ее выполнения

Опыт 1. Маркировка зажимов обмоток ТАД

Определить магнитное начало и магнитный конец каждой фазы обмотки электродвигателя можно по следующей методике:

1. Пользуясь тестером в режиме омметра, определить принадлежность шести концов трем фазным обмоткам статора попарно.

2. Обмотки любых двух фаз соединить последовательно и подключить к ним питающее напряжение сети $U = 100$ В, а к выводам третьей фазной обмотки подключить вольтметр. Схема исследования приведена на рис. 7.10.

Если две обмотки включены согласно – т. е. конец первой обмотки подключен к началу второй, то в статоре образуется магнитное поле, в третьей обмотке возникнет ЭДС, и стрелка вольтметра стрелка прибора отклонится. Занести в табл. 7.1 цвет проводов для двух обмоток.

Если стрелка вольтметра не отклоняется, поменять местами концы второй обмотки и повторить опыт.

3. Поменяв местами вторую и третью фазы обмотки, выяснить, где магнитное начало и магнитный конец третьей фазы обмотки двигателя.

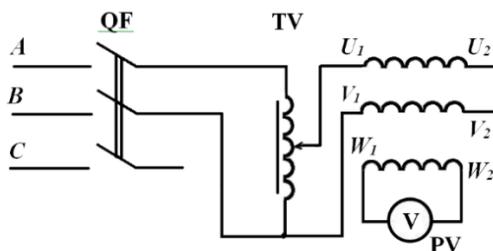


Рис. 7.9. Схема опыта определения магнитного начала обмоток

Результаты исследования занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Определение маркировки зажимов обмоток двигателя

	Начала обмоток		Концы обмоток	
	Обозначение	Цвет провода	Обозначение	Цвет провода
Фаза А	U_1		U_2	
Фаза В	V_1		V_2	
Фаза С	W_1		W_2	

Опыт 2. Включение ТАД в однофазную цепь

1. Включить исследуемый ТАД в однофазную цепь по схеме рис. 7.10, *а* или *б* (по указанию преподавателя).

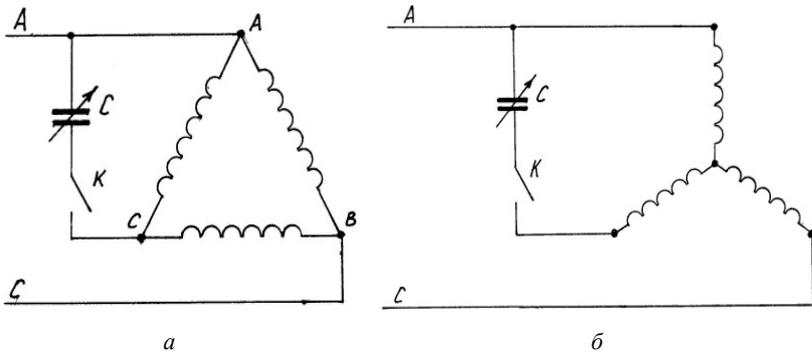


Рис. 7.10. Включение трехфазного асинхронного двигателя в однофазную цепь:
а – треугольником,
б – звездой

2. Убедиться в необходимости начального внешнего момента трогания при запуске таких двигателей без пусковой емкости.

3. Убедиться, что схемы обеспечивают трогание с места и вращение трехфазного асинхронного двигателя, включенного в однофазную цепь.

4. Определить опытным путем величину пусковой емкости $C_{п}$, необходимой для задания двигателю направления вращения.

5. Уменьшая емкость, найти значение рабочей емкости $C_{р}$, при которой наблюдается устойчивая работа двигателя.

Опыт 2. Исследование рабочих характеристик двигателя

Для выполнения этого пункта программы использовать лабораторную установку с трехфазным короткозамкнутым двигателем типа АВ-0012-4, схема которой представлена на рис. 7.11.

1. Изменяя плавно ток в обмотке возбуждения электромагнитного тормоза, произвести измерения значений U_1 , I_1 , n_2 , M и P_1 при различных значениях нагрузки. Данные измерений внести в табл. 7.2.

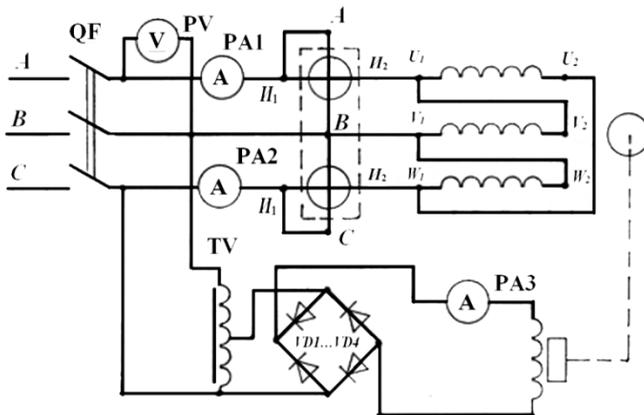


Рис. 7.11. Схема лабораторного стенда для определения рабочих характеристик трехфазного асинхронного двигателя

2. По данным измерений провести вычисление значений: P_2 , s , $\cos \varphi_1$ и η .

Данные вычислений внести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Результаты испытания трехфазного асинхронного двигателя

Измерено					Вычислено			
U_1 , В	I_1 , А	n_2 , об/мин	P_1 , Вт	M , Нм	$\cos \varphi_1$	P_2 , Вт	s , %	η , %
	0							
	2							
	3							
	4							
	5							
	6							

3. Построить рабочие характеристики в виде зависимостей:

$$I_1 = f(P_2); n_2 = f(P_2); \cos \varphi_1 = f(P_2); M = f(P_2); s = f(P_2); \eta = f(P_2).$$

4. Оценить полученные характеристики.

5. Сделать выводы.

Содержание отчета:

1. Цель и программа работы.
2. Схемы электрические принципиальные лабораторных установок.
3. Таблицы опытных и расчетных данных.
4. Основные формулы, используемые при расчете.
5. Графики зависимостей.
6. Выводы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Как устроен трехфазный асинхронный двигатель?
2. В чем состоит принцип работы асинхронного двигателя?
3. Трехфазная система токов создает вращающееся магнитное поле двигателя. По какой формуле можно рассчитать его угловую частоту вращения?
4. Как можно изменить направление вращения ротора двигателя?
5. Какие существуют методы пуска в ход асинхронного двигателя?
6. Каким образом можно изменять частоту вращения двигателя?
7. Как определяется КПД двигателя и какова его зависимость от нагрузки?
8. Как определяется коэффициент мощности двигателя и как он зависит от нагрузки?

Лабораторная работа № 8
**ИСПЫТАНИЕ ГЕНЕРАТОРОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ
ЭНЕРГИИ**

Цель работы: исследовать действие трехфазного синхронного генератора и генератора постоянного тока путем снятия их основных характеристик: холостого хода, внешней и регулировочной.

Общие сведения из теории

Синхронный генератор

Синхронный генератор является генератором переменного трехфазного тока. Синхронные генераторы стоят практически на всех электростанциях (тепловых, гидравлических, атомных).

Состоит синхронный генератор, как и другие электрические машины, из статора и ротора. Статор собран из листов электротехнической стали. В пазах по внутренней окружности статора со сдвигом в 120° друг относительно друга размещены три обмотки.

Ротор синхронного генератора представляет собой электромагнит, обмотка возбуждения которого питается от постороннего источника постоянного тока. Ток к обмотке возбуждения ротора подводится посредством графитных щеток через контактные кольца, вращающиеся вместе с ротором.

При вращении ротора вращается и создаваемое им магнитное поле, индуцируя ЭДС в обмотках статора.

Частота f ЭДС, наводимой в фазных обмотках статора, зависит от частоты вращения ротора n , числа пар его полюсов p и определяется зависимостью:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Обмотки статора размещены по его окружности со сдвигом в 120° , поэтому начальные фазы наводимых на этих обмотках ЭДС также отличаются на 120° . Частота ЭДС в обмотках точно совпадает с частотой вращения ротора, поэтому название генератора – *синхронный*.

Свойства генератора определяются его характеристиками. Различают характеристику холостого хода генератора: внешнюю и регулировочную.

Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода показывает зависимость ЭДС генератора от тока возбуждения при условии, что частота вращения ротора, а, следовательно, частота ЭДС генератора постоянна. Цепь нагрузки генератора должна быть разомкнута и ток нагрузки равен нулю:

$$E = f(I_B) \text{ при } I_H = 0 \text{ и } n = \text{const.}$$

Примерный вид характеристики холостого хода синхронного генератора представлен на рис. 8.1.

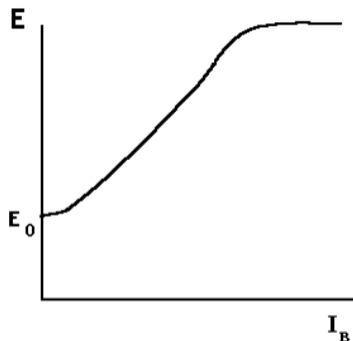


Рис. 8.1. Характеристика холостого хода синхронного электрического генератора

Характеристика холостого хода фактически соответствует кривой намагничивания машины. При малых значениях тока возбуждения сталь машины не насыщена, магнитный поток, а, следовательно, и ЭДС растут пропорционально току возбуждения. При больших значениях рост магнитного потока и ЭДС замедляется вследствие наступления магнитного насыщения стали генератора. Как видно из рисунка, начинается кривая не с нуля. Даже при отсутствии тока возбуждения за счет остаточного магнитного потока ротора будет наводиться в обмотках машины небольшое значение ЭДС E_0 .

Внешняя характеристика

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения U на зажимах генератора от тока нагрузки I_H при постоянных значениях коэффициента мощности $\cos \varphi$, тока возбуждения I_B и номинальной частоте вращения ротора n :

$$U = f(I_H) \text{ при } I_B = \text{const}, \cos \varphi = \text{const}.$$

Примерный вид внешней характеристики синхронного генератора показан на рис. 8.2, а. Начальной точкой характеристики будет напряжение холостого хода U_0 . С ростом тока нагрузки напряжение генератора изменяется по закону, определяемому выражением:

$$\vec{U} = \vec{E} - \overline{XI_H},$$

где E – ЭДС в обмотках статора генератора, наводимая согласно закону электромагнитной индукции;

X – реактивная составляющая внутреннего сопротивления обмотки генератора (активной составляющей сопротивления ввиду его малости пренебрегаем);

I_H – ток нагрузки.

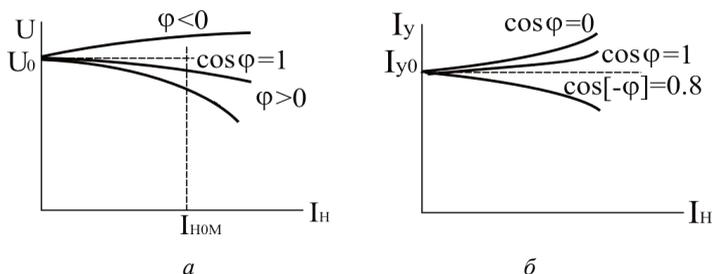


Рис. 8.2. Характеристики синхронного генератора:

а – внешние;

б – регулировочные

Падение напряжения на индуктивном сопротивлении обмоток генератора XI_H растет с увеличением тока нагрузки независимо от ее характера (активная, индуктивная, емкостная). Величина же ЭДС зависит, кроме всего прочего, от реакции якоря. При индуктивной нагрузке поток реакции якоря носит продольно размагничивающий

характер, уменьшает результирующий поток машины Φ , а, следовательно, и E_0 . Поэтому, чем ближе характер нагрузки к индуктивному, тем интенсивнее будет снижаться ЭДС E_0 и напряжение с ростом тока нагрузки I (кривая 1).

При активной нагрузке реакция якоря носит поперечный характер, и снижение напряжения будет вызываться в основном падением напряжения в обмотках генератора (кривая 2).

При активно-емкостной нагрузке (кривая 3) реакция якоря носит продольно-намагничивающий характер. Поток реакции якоря усиливает основной магнитный поток машины, а, следовательно, и ЭДС E_0 в ее обмотках. Потому с ростом тока нагрузки I , напряжение на выходе генератора будет увеличиваться по сравнению с U_0 .

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика – это зависимость тока возбуждения I_b , необходимого для поддержания значения напряжения на выходе генератора $U = \text{const}$ от тока нагрузки I_n при постоянной частоте вращения n :

$$I_b = f(I_n) \text{ при } U = \text{const} \text{ и } n = \text{const}.$$

Примерный вид регулировочной характеристики представлен на рис. 8.2, б.

Регулировочная характеристика показывает, как нужно изменять ток возбуждения, чтобы с изменением тока нагрузки напряжение генератора оставалось постоянным.

Генераторы и двигатели постоянного тока

Генераторы и двигатели постоянного тока обладают свойствами обратимости и устроены практически одинаково. Основными узлами их устройства, как и у машин переменного тока, являются статор и ротор. Статор – неподвижный электромагнит, создающий основное магнитное поле машины. Ротор – вращающаяся часть машины.

Статор служит для создания постоянного во времени и пространстве магнитного поля и представляет собою электромагнит с ярко выраженными полюсами.

Статор состоит из следующих элементов (рис. 8.3): станины 4, главных полюсов с полюсными наконечниками 3 и обмотками возбуждения 5, дополнительных полюсов, подшипниковых щитов 6 и щеточной траверсы со щетками 2. Станина – основа для всей машины, к ней крепятся все другие детали; изготавливается из стального литья или стального листового проката. Кроме того, в МПТ станина является также и магнитопроводом.

Главные полюса служат для создания постоянного магнитного поля; выполняются из набора листов электротехнической стали и крепятся болтами в станине. Дополнительные полюса располагаются между главными, предназначены для улучшения условий коммутации и используются в МПТ средней и большей мощности ($P > 1,5$ кВт). Обмотки главных и дополнительных полюсов представляют собою обычные катушки, выполненные из изолированного медного провода.

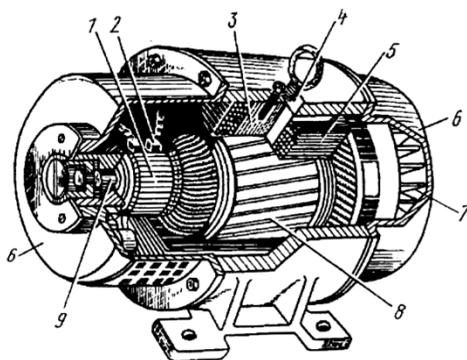


Рис. 8.3. Машина постоянного тока

Подшипниковые щиты 6 закрывают статор с торцов и часто являются опорой для ротора, так как в них впрессованы подшипники. В одном из подшипниковых щитов у машин средней и большой мощности закреплена также щеточная траверса, к которой крепятся изолированные от корпуса металлические пальцы. На кольцах устанавливаются щеткодержатели со щетками.

Принцип действия генератора постоянного тока с самовозбуждением основан на явлениях электромагнитной индукции. Когда приводной двигатель приводит во вращение якорь генератора,

в проводниках его обмотки наводится начальная небольшая ЭДС за счет пересечения этих проводников с полем остаточного магнитного потока полюсов.

Складываясь с остаточным магнитным потоком, дополнительный магнитный поток усиливает общий магнитный поток машины. Таким образом, происходит лавинообразный рост магнитного потока, и ЭДС-генератор самовозбуждается.

Для самовозбуждения должны выполняться следующие три условия:

- 1) наличие остаточного магнитного потока полюсов;
- 2) возникающая начальная ЭДС в обмотке ротора должна быть такого направления, чтобы вызываемый ею ток и магнитный поток совпадали с остаточным потоком, усиливая его;
- 3) сопротивление в цепи обмотки возбуждения должно быть меньше критического значения.

Для того чтобы переменную ЭДС, возникающую в обмотке якоря, преобразовать в постоянную ЭДС на выходе генератора, служит коллектор.

Коллектор представляет собою цилиндр *1*, набранный из медных клиновидных пластин (рис. 8.4), изолированных друг от друга и от корпуса изоляционным материалом.

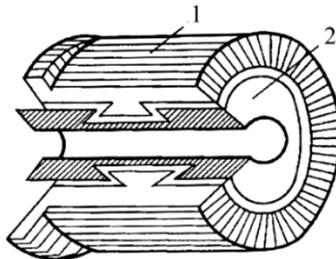


Рис. 8.4. Коллектор машины постоянного тока

Пластины крепятся на стальной втулке 2 с помощью прижимного конуса и гайки. К краям коллекторных пластин припаиваются проводники обмоток якоря, к их цилиндрической поверхности прижимаются щетки.

Свойства генератора наиболее полно находят свое отражение в его характеристиках.

Характеристика холостого хода

Характеристика холостого хода генератора параллельного возбуждения представляет собой зависимость ЭДС E , индуцируемой в якоре, от тока возбуждения I_B при постоянной номинальной скорости вращения n_n и при токе во внешней цепи, равном нулю (при разомкнутой внешней цепи):

$$E = f(I_B) \text{ при } I_n = 0 \text{ и } n = \text{const.}$$

Общий вид характеристики холостого хода показан на рис. 8.5, а.

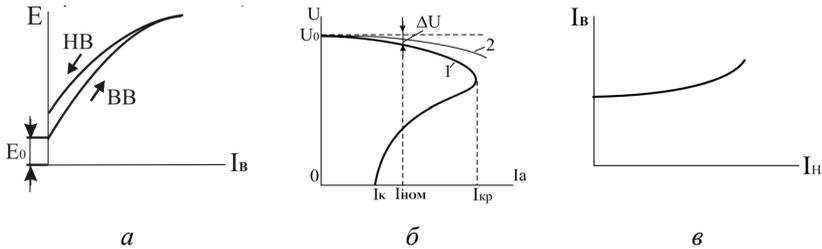


Рис. 8.5. Характеристики генератора постоянного тока с параллельным самовозбуждением:
 а – холостого хода;
 б – внешняя характеристика;
 в – регулировочная характеристика

Внешняя характеристика

Внешняя характеристика представляет собой зависимость напряжения нагрузки U от тока нагрузки I_n при постоянном сопротивлении возбуждения токе $I_B = \text{const}$ и постоянной скорости вращения ротора $n = \text{const}$, т. е.

$$U = f(I_n) \text{ при } n = \text{const} \text{ и } I_B = \text{const.}$$

Примерный вид внешней характеристики генератора параллельного возбуждения изображен на рис. 8.5, б.

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика генератора параллельного возбуждения представляет собой зависимость тока возбуждения I_B от

тока нагрузки I_H при постоянном номинальном напряжении U на зажимах генератора и постоянной скоростью вращения n :

$$U = f(I_H) \text{ при } U = U_H = \text{const}, n = \text{const}.$$

Эта характеристика имеет большое практическое значение, так как позволяет судить о том, каким образом и в каких пределах необходимо регулировать ток возбуждения генератора, чтобы напряжение на зажимах генератора оставалось постоянным.

Примерный вид регулировочной характеристики генератора с параллельным возбуждением показан на рис. 8.5, в.

Программа работы и методика ее выполнения

Опыт 1. Синхронный генератор

1. Собрать на лабораторном стенде схему для снятия характеристик синхронного генератора (рис. 8.6).

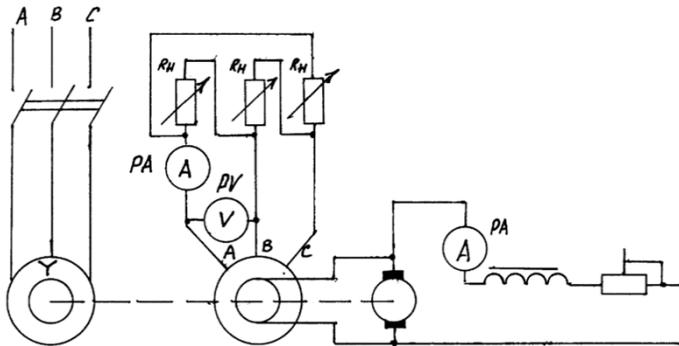


Рис. 8.6. Схема испытания трехфазного синхронного генератора при питании обмотки возбуждения от возбудителя, находящегося на валу генератора

Характеристика холостого хода

Для снятия характеристики холостого хода отключить нагрузку генератора (выключить все сопротивления или лампы нагрузочного реостата), разомкнуть цепь возбуждения, запустить приводной двигатель генератора при введенном реостате R_B и, увеличивая этим ток возбуждения I_B , снять остальные точки зависимости $E = f(I_B)$.

Данные измерения занести в табл. 8.1 и по ним построить график полученной зависимости. При этом нужно обратить внимание на ход кривой графика.

Таблица 8.1

Характеристика холостого хода синхронного генератора

I_b, A	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,7	1	1,2	1,4	1,8	2
E, B												

Внешняя характеристика

Для снятия внешней характеристики запустить приводной двигатель генератора при введенном реостате R_b в его цепи возбуждения и отключенной нагрузке. С помощью R_b устанавливается такой ток возбуждения, чтобы при холостом ходе на зажимах генератора было напряжение $U = 230$ В. Затем, поддерживая в цепи возбуждения ток $I_b = \text{const} = 1$ А, постепенно нагружать генератор включением ламп или увеличением нагрузочного роста R_n увеличивать ток нагрузки от 0 до номинального значения ($I_{\text{ном}} = 5$ А). Данные измерения занести в табл. 8.2 и построить график полученной зависимости.

Таблица 8.2

Внешняя характеристика синхронного генератора

I_n, A	0								
U, B	230								

При помощи внешней характеристики генератора определить относительное понижение напряжения в процентах, при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки, по формуле

$$\Delta U \% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100 \%,$$

где U_0 – напряжение на зажимах генератора при холостом ходе;

U_n – номинальное напряжение на зажимах генератора при номинальной нагрузке.

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика снимается так же, как и внешняя характеристика, с той лишь разницей, что при увеличении нагрузки для поддержания постоянного напряжения на зажимах генератора необходимо регулировать ток возбуждения. При этом изменять ток возбуждения нужно только в одном направлении – увеличивая или уменьшая его, так как влияние гистерезиса может исказить результаты опыта. Результаты измерений занести в табл. 8.3 и использовать для построения регулировочной характеристики.

Таблица 8.3

Регулировочная характеристика синхронного генератора

I_H, A								
I_B, A								

Опыт 2. Генератор постоянного тока

1. Собрать на лабораторном стенде схему для снятия характеристик генератора постоянного тока с параллельным возбуждением (рис. 8.7).

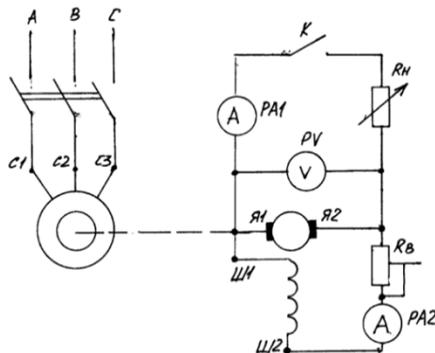


Рис. 8.7. Схема снятия характеристик генератора постоянного тока параллельного возбуждения

Характеристика холостого хода

Для снятия характеристики холостого хода отключить нагрузку генератора (выключить все сопротивления или лампы нагрузочного

реостата), полностью ввести реостат в цепи возбуждения, разомкнуть цепь возбуждения, запустить приводной двигатель, снять первый отсчет для табл. 8.4.

Таблица 8.4

Характеристика холостого хода генератора постоянного тока

I_b, A	0												
E, B													250

Затем замкнуть цепь возбуждения, плавно изменяя реостатом возбуждения ток I_b , снять второй и последующие отсчеты E , заполняя в таблице графу значений I , до значений ЭДС. На зажимах генератора около 250 В. По результатам измерений построить график зависимости $E = f(I_b)$ для $I = 0, n = \text{const}$.

При этом нужно обратить внимание на ход кривой. За счет остаточного магнетизма полюсов кривая начинается не с нуля. На начальном участке кривой ЭДС генератора возрастает почти пропорционально росту тока возбуждения. С увеличением тока возбуждения выше определенного значения наступает магнитное насыщение стали, дальнейший рост ЭДС замедляется.

Внешняя характеристика

Для снятия внешней характеристики запустить приводной двигатель генератора при введенном реостате R_E в цепи возбуждения и отключенной нагрузке. Реостатом возбуждения установить на зажимах генератора напряжение холостого хода $U_0 = 220$ В. Затем, поддерживая в цепи возбуждения ток $I_b = \text{const} = 150$ мА, плавно увеличивать нагрузку генератора включением ламп или сопротивлений нагрузочного реостата до номинального значения тока нагрузки $I_n \approx 5$ А.

Измеренные значения тока нагрузки I и соответствующие им значения напряжения U на зажимах генератора занести в табл. 8.5 и построить график полученной зависимости $U = f(I)$ при $I_b = \text{const}$.

Таблица 8.5

Внешняя характеристика генератора постоянного тока

I, A									
U, B									

По внешней характеристике генератора определить относительное понижение напряжения на его выходе при переходе от режима холостого хода к режиму номинальной нагрузки, используя формулу

$$\Delta U \% = \frac{U_0 - U_n}{U_n} \cdot 100 \%,$$

где U_0 – напряжение на зажимах генератора при холостом ходе;

U_n – напряжение генератора при номинальном значении тока нагрузки.

Регулировочная характеристика

Регулировочная характеристика снимается так же, как и внешняя характеристика, с той лишь разницей, что при увеличении нагрузки для поддержания постоянного значения напряжения генератора необходимо изменять ток возбуждения. При этом изменение тока возбуждения должно производиться только в одном направлении – увеличения или уменьшения его, чтобы избежать искажения результатов опыта за счет гистерезиса.

Результаты измерения значений тока нагрузки I_n и соответствующих им значений тока возбуждения I_b занести в табл. 8.6 и построить график полученной зависимости $I_b = f(I)$ при $U_b = \text{const}$, $n_n = \text{const}$.

Таблица 8.6

Регулировочная характеристика генератора постоянного тока

I_n, A								
I_b, A								

Содержание отчета:

1. Цель и программа работы.
2. Схемы лабораторных установок.
3. Таблицы экспериментальных данных.
4. Графики характеристики холостого хода, внешней и регулировочной характеристик для синхронного электрического генератора и генератора постоянного тока.
5. Выводы по результатам наблюдений.

Вопросы для самоконтроля:

1. В чем заключается принцип работы трехфазного синхронного генератора?
2. Чем определяется частота изменения ЭДС на выходе синхронного генератора?
3. Почему трехфазный генератор называется синхронным?
4. Что называется характеристикой холостого хода генератора?
5. Что называется внешней характеристикой генератора?
6. Что такое регулировочная характеристика генератора?
7. Из каких основных узлов состоит генератор постоянного тока с параллельным возбуждением?
8. Назначение и устройство коллектора генератора.
9. В чем заключается самовозбуждение генератора, и какие условия должны выполняться для его осуществления?
10. От каких факторов зависит ЭДС на выходе генератора, и каким выражением она определяется?
11. Что называется характеристикой холостого хода генератора?
12. Что называется внешней и регулировочной характеристиками?

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕУПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Цели работы: 1) изучить принципы работы, электрические схемы и свойства однофазных и трехфазных выпрямителей и сглаживающих фильтров; 2) исследовать однофазные и трехфазные выпрямители без фильтра и с простейшим емкостным сглаживающим фильтром.

Общие сведения из теории

Выпрямителем называется устройство, преобразующее переменное, чаще синусоидальное напряжение, в постоянное. Структурно выпрямитель включает в себя следующие элементы (рис. 9.1): силовой трансформатор (Т), вентили (В), сглаживающий фильтр (Ф).

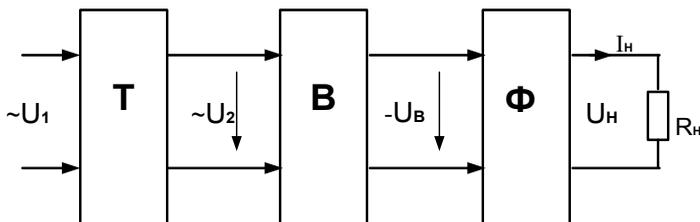


Рис. 9.1. Структурная схема неуправляемого выпрямителя

Основным элементом выпрямителя является вентиль – электронный элемент с условной проводимостью (диод, тиристор), представляющий собой нелинейный элемент.

Наибольшее распространение получили следующие выпрямители: однофазный однополупериодный, однофазный двухполупериодный, трехфазный мостовой (схема Ларионова).

При анализе работы выпрямителей будем считать диоды идеальными, т. е. их сопротивление в прямом направлении равно нулю, в обратном – бесконечности. Электрическая схема однофазного однополупериодного выпрямителя и эпюры напряжений и токов, характеризующие его работу без сглаживающего фильтра и с простейшим емкостным фильтром, приведены на рис. 9.2.

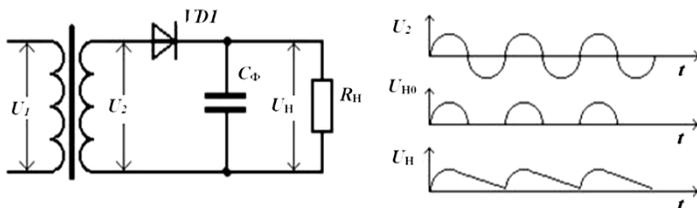


Рис. 9.2. Схема однофазного однополупериодного выпрямителя и энюры напряжения для нее

Предположим, что напряжение на вторичной обмотке трансформатора является синусоидальным, т. е. $U_2 = U_{2m} \sin \omega t$. При положительном полупериоде этого напряжения диод VD открыт и в резисторе нагрузки R_n протекает прямой ток $i_n = U_{2m}/R_n \sin \omega t$. При этом напряжение на нагрузке $U_n = U_2 = U_{2m} \sin \omega t$. Падение напряжения на вентиле сравнительно мало, т. к. сопротивление его в прямом направлении $R_{в.пр} \ll R_n$.

При отрицательных значениях U_2 диод закрыт, его сопротивление $R_{в.обр} \gg R_n$, поэтому U_n мало, и падение напряжения на вентиле $U_v = U_2$.

Периодическое повторение этих процессов формирует на нагрузке несинусоидальное выпрямленное пульсирующее напряжение U_n , постоянная составляющая которого (среднее значение выпрямленного напряжения) определяется по формуле

$$U_{\text{н ср}} = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} U_{\text{н м}} \sin \omega t dt = \frac{U_{\text{н м max}}}{\pi}.$$

Учитывая, что действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора $U_2 = \frac{U_{2 \text{ max}}}{\sqrt{2}}$, получим $U_{\text{ср}} = \frac{\sqrt{2} U_2}{\pi} \approx 0,45 U_2$.

Главным недостатком такого выпрямителя является большой коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения p , который представляет собой отношение амплитуды первой гармоники U_{1m} к постоянной составляющей выпрямленного напряжения $U_{\text{н ср}}$, т. е.

$$p = \frac{U_{\text{н max}}}{U_{\text{н ср}}} = \frac{U_{\text{н max}}}{2U_{\text{н max}}/\pi} = \frac{\pi}{2} \approx 1,57.$$

В этой формуле учтено, что при разложении полусинусоиды в ряд Фурье $U_{n1} = U_{n\max} / 2$.

Вторым недостатком такого простейшего выпрямителя является подмагничивание сердечника трансформатора постоянным током. Поэтому они применяются сравнительно редко для питания цепей малой мощности (10–15 Вт) высокого напряжения, например, электронно-лучевых трубок.

Двухполупериодный выпрямитель

Схема двухполупериодного выпрямителя и эпюры, поясняющие ее работу, приведены на рис. 9.3.

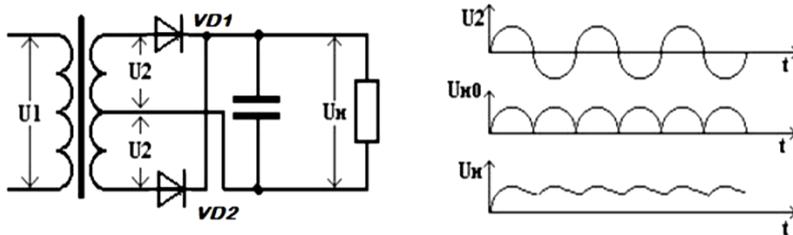


Рис. 9.3. Схема двухполупериодного выпрямителя с выводом от средней точки и эпюры напряжения, поясняющие принцип ее работы

Этот выпрямитель имеет уже два вентиля – $VD1$ и $VD2$, включенных между вторичной обмоткой трансформатора и сопротивлением нагрузки.

Вторичная обмотка трансформатора имеет среднюю точку. Диоды работают поочередно в течение того полупериода, при котором на аноде устанавливается положительное напряжение. Во время положительного полупериода открыт диод $VD1$, и через него и R_n протекает ток i_1 . Во время отрицательного полупериода $VD1$ закрывается, а открывается $VD2$, и через него и R_n протекает i_2 . Таким образом, на нагрузке будет также пульсирующее напряжение, действующее в каждый полупериод синусоиды, т. е.

$$U_n = |U_2| = |U_{2m} \sin \omega t|.$$

В двухполупериодном выпрямителе среднее выпрямленное напряжение $U_{\text{нр}}$ вдвое больше, а пульсации p значительно меньше по сравнению с однополупериодным ($U_{\text{нр}} = 0,9U_2$, $p = 0,67$).

Рассмотренная схема двухполупериодного выпрямителя требует специального трансформатора со средней точкой во вторичной обмотке.

Это усложняет схему и уменьшает КПД выпрямителя.

Однофазный двухполупериодный мостовой выпрямитель

Схема двухполупериодного мостового выпрямителя и эпюры, поясняющие ее работу, приведены на рис. 9.4.

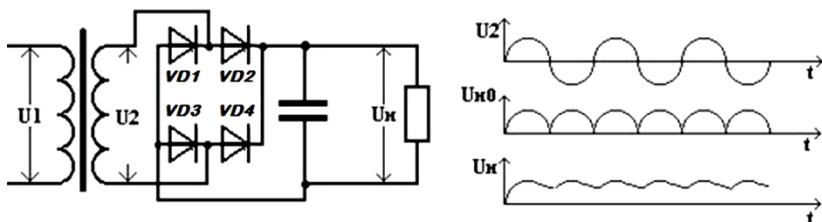


Рис. 9.4. Однофазный мостовой выпрямитель

Такой выпрямитель содержит четыре вентиля – $VD1 \dots VD4$, включенных по мостовой схеме. К одной диагонали моста подано синусоидальное напряжение, а к другой подключена нагрузка. Во время положительного полупериода U_2 открыты вентили $VD1$ и $VD4$ и протекает ток i_2^+ от верхнего выхода трансформатора (от плюса) к нижнему (к минусу). Вентили $VD2$ и $VD3$ будут закрыты, т. к. у них на катодах будет положительное напряжение. Во время отрицательных полупериодов U_2 , т. е. когда внизу на трансформаторе будет (+), а сверху (–), открываются $VD2$ и $VD3$ (у них на анодах положительное напряжение), а $VD1$ и $VD4$ закрываются. По выпрямителю протекает ток i_2^- , который по нагрузке будет протекать в том же направлении, что i_2^+ . Эпюры, поясняющие принцип работы этого выпрямителя, такие же, как и для двухполупериодного (см. рис. 9.4). Мостовой выпрямитель имеет такие же значения параметров, как и обычный двухполупериодный ($U_{н\text{ср}} = 0,9U_2$, $p = 0,67$), но КПД у мостового в два раза выше и может достигать 80 %.

Трехфазный мостовой выпрямитель

В трехфазных цепях чаще всего используется трехфазный мостовой выпрямитель, предложенный в 1923 году А. Н. Ларионовым. Электрическая схема такого выпрямителя и эпюры, поясняющие его работу, представлены на рис. 9.5.

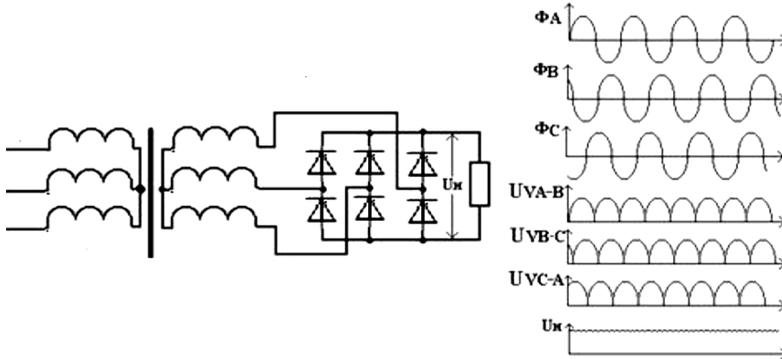


Рис. 9.5. Схема трехфазного мостового выпрямителя и эпюры его работы

В схеме Ларионова шесть вентилей – $VD1...VD6$, три из них ($VD1$, $VD3$ и $VD5$) подключены катодами к нагрузке, оставшиеся три ($VD2$, $VD4$ и $VD6$) – анодами к нагрузке. Вторичная обмотка трансформатора может включаться треугольником или звездой без нейтрального провода. Такой выпрямитель выпрямляет линейное напряжение. В каждый момент времени работают (включены) два диода (вентиль): один – у которого анод находится под наибольшим напряжением, второй – у которого катод находится под наименьшим напряжением. За один период синусоидального напряжения будет шесть импульсов, поэтому среднее значение выпрямленного напряжения

$$U_{\text{н ср}} = \frac{6}{T} \int_0^T U_{\text{н max}} \sin \omega t dt = \frac{3}{\pi} U_{\text{н max}}.$$

Амплитуда линейного напряжения трансформатора:

$$U_{2m} = U_{\text{н m}} = \sqrt{2} U_2,$$

где U_2 – действующее значение линейного напряжения во вторичной обмотке трансформатора.

Учитывая это, получим

$$U_{\text{нсп}} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} U_2 \approx 1.35U_2,$$

т. е. среднее значение выпрямленного напряжения будет в 1,35 раза больше действующего значения выпрямляемого напряжения. Выпрямленное напряжение U_n будет иметь малые пульсации первой гармоники U_{n1} относительно $U_{\text{нсп}}$, поэтому коэффициент пульсаций $p = 0,057$. Малые пульсации позволяют в таком выпрямителе обойтись без фильтра.

Внешняя характеристика выпрямителя

Реальные трансформаторы и вентили имеют сопротивления, поэтому при протекании тока через нагрузку $I_{\text{нсп}}$ возникают падения напряжения на сопротивлении вторичной обмотки трансформатора R_T и прямом сопротивлении вентиля $R_{\text{пр}}$ и напряжение на нагрузке уменьшается, т. е.

$$U_{\text{нсп}} = U_{\text{нсп}} - (R_{\text{пр}} + R_T)I_{\text{нсп}},$$

где $U_{\text{нсп}}$ – напряжение холостого хода.

Зависимость $U_{\text{нсп}} = f(I_{\text{нсп}})$ называется внешней характеристикой выпрямителя.

Сглаживающие фильтры

Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения применяются сглаживающие фильтры. Основными элементами фильтров являются конденсаторы, катушки индуктивности (дрессели) и транзисторы, сопротивления которых различны для постоянного и переменного токов.

Эффективность фильтра характеризуется коэффициентом сглаживания

$$q = P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}},$$

где $P_{\text{вх}}$ и $P_{\text{вых}}$ – коэффициенты пульсаций на входе и выходе фильтра.

Простейшим является емкостной фильтр, который создается включением конденсатора C_ϕ параллельно нагрузке. Принцип действия такого фильтра заключается в периодическом заряде и разряде конденсатора. Конденсатор C_ϕ заряжается через вентили, когда $U_2 > U_c$, и разряжается при $U_2 < U_c$ через R_n , когда вентили закрыты (см. эпюры на рис. 9.2 и 9.3). Такой фильтр целесообразно использовать, если $R_n \gg R$ цепи заряда, включающее прямое сопротивление вентилей (вентилей) и сопротивление вторичной обмотки трансформатора. В этом случае C_ϕ заряжается сравнительно быстро, т. к. постоянная заряда конденсатора $\tau = C_\phi R$ мала. Разряжается C_ϕ сравнительно долго, т. к. постоянная разряда $\tau = C_\phi R_n$ велика. Емкость конденсатора фильтра C_ϕ выбирают по условию:

$$X_c = \frac{1}{\omega C_\phi} \ll R_n, \text{ откуда } C_\phi \gg \frac{1}{\omega R_n}.$$

Индуктивным фильтром является катушка индуктивности с параметрами R_ϕ и L_ϕ , включаемая последовательно нагрузке R_n (рис. 9.7).

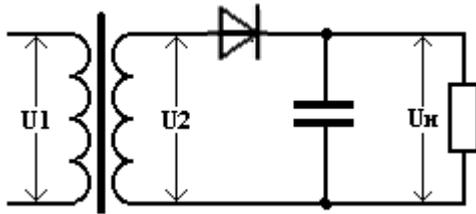


Рис. 9.6. Схема выпрямителя с емкостным фильтром

Несинусоидальное выпрямленное напряжение можно представить гармоническим рядом, состоящим из постоянной составляющей и суммы синусоид различных частот. Индуктивность не оказывает сопротивления постоянной составляющей тока нагрузки, а полное сопротивление k -гармоники определяется по формуле

$$Z_k = \sqrt{(R_n + R_\phi)^2 + (k\omega L_\phi)^2},$$

где $\omega = 2\pi f$ – круговая частота;

f – частота выпрямляемого синусоидального тока;

k – номер гармоники.

Видим, что с ростом номера гармоники k сопротивление Z_k увеличивается. Индуктивный фильтр используется, когда $R_n \gg R_\phi$, а $\omega L_\phi \gg R_n$. В этом случае при включении фильтра постоянная составляющая тока почти не изменяется, а переменная составляющая значительно уменьшается, поэтому пульсации тока нагрузки и напряжения уменьшаются.

Более эффективными являются фильтры с одновременным включением L_ϕ и C_ϕ , т. е. Г-образные LC -фильтры и П-образные LC -фильтры. Недостатком индуктивного фильтра являются его громоздкость и вес.

В электронных фильтрах вместо катушки индуктивности включают транзисторы. Это обусловлено тем, что сопротивление промежутка коллектор-эмиттер транзистора постоянному току в 100...1000 раз меньше, чем переменному току, поэтому пульсации уменьшаются в 95 раз.

Программа работы и порядок выполнения

1. Собрать на стенде цепь по схеме однофазного однополупериодного выпрямителя (рис. 9.7, ключи $SA1$ и $SA2$ выключены).

2. Подключить к схеме осциллограф, подав на его вход синусоидальное напряжение с точек A и B вторичной обмотки трансформатора (U_2).

3. Включить осциллограф и стенд выпрямителя и добиться их функционирования. При этом на экране осциллографа должна появиться исходная синусоида входного напряжения. Подать на вход осциллографа напряжение с нагрузки выпрямителя U_n и убедиться в работе схемы.

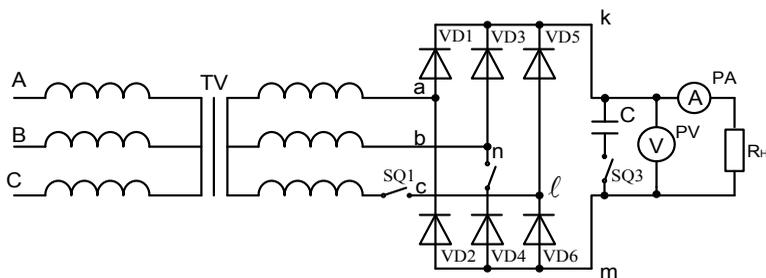


Рис. 9.7. Схема лабораторной установки

4. Снять внешние характеристики выпрямителя $U_{\text{нр}} = f(I_{\text{нр}})$ без фильтра и с емкостным фильтром, обеспечивающим заметное сглаживание выпрямленного напряжения при всех значениях тока $I_{\text{нр}}$ (кроме нуля). Ток нагрузки изменять от минимального до максимально возможного значения, зафиксировав не менее пяти различных значений. Результаты измерений записать в табл. 9.1.

5. Зарисовать с экрана осциллографа совмещенные кривые U_2 и $U_{\text{н}}$ без фильтра и с фильтром в режимах холостого хода и максимального тока. На осциллограммах обозначить оси времени и напряжения, а также измеренные в п. 4 величины $U_{\text{нр}}$. Снятие осциллограмм производить при одинаковых коэффициентах усиления осциллографа.

Таблица 9.1

Результаты испытаний неуправляемых выпрямителей

Тип выпрямителя	Однофазный однополупериодный				Однофазный мостовой				Трехфазный мостовой без фильтра	
	без фильтра		с фильтром		без фильтра		с фильтром			
U_2	$U_{\text{нр}}$	$I_{\text{нр}}$	$U_{\text{нр}}$	$I_{\text{нр}}$	$U_{\text{нр}}$	$I_{\text{нр}}$	$U_{\text{нр}}$	$I_{\text{нр}}$	$U_{\text{нр}}$	$I_{\text{нр}}$
$U_{\text{нр}}/U_2$										

6. Собрать на стенде электрическую цепь по схеме однофазного мостового выпрямителя (рис. 9.7, SA1 выключен) и выполнить исследования согласно п. 4 и 5.

7. Собрать на стенде электрическую цепь по схеме трехфазного мостового выпрямителя (рис. 9.7, SA1 и SA2 включены) и выполнить исследования, согласно п. 4 и 5.

8. Измерить цифровым вольтметром напряжение на входе выпрямителя U_2 , вычислить для каждого выпрямителя отношение $U_{\text{нр}}/U_2$ в режиме холостого хода и записать в табл. 9.1.

9. Данные предъявить преподавателю и только с его разрешения выключить осциллограф и стенд.

Содержание отчета:

1. Название и цель работы.
2. Программа и порядок ее выполнения, включая общую электрическую схему, таблицы и осциллограммы исследований.
3. Графики внешних характеристик всех выпрямителей в одной общей системе координат.
4. Основные расчетные формулы.
5. Сравнительная оценка исследованных схем и выводы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Назначение и функциональная схема выпрямителя.
2. Принципы работы и основные параметры полупроводниковых диодов.
3. Электрические схемы и принципы работы неуправляемых выпрямителей различных типов.
4. Что такое коэффициент пульсаций и от чего он зависит?
5. Что такое внешняя характеристика и от чего она зависит?
6. Электрические схемы и принципы работы различных сглаживающих фильтров.
7. Что такое коэффициент сглаживания фильтра и от чего он зависит?

Лабораторная работа № 10
**ИЗУЧЕНИЕ ЛОГИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ
И КОМБИНАЦИОННЫХ УСТРОЙСТВ**

Цели работы: 1) изучить принцип построения логических элементов цифровых интегральных микросхем; изучить принцип построения комбинационных устройств на основе логических элементов; 2) экспериментально исследовать логические элементы и комбинационные устройства.

Общие сведения из теории

В ЭВМ, цифровых измерительных приборах и других цифровых устройствах широко применяются логические элементы (ЛЭ). Каждый ЛЭ выполняет вполне определенную логическую операцию над цифровой информацией. ЛЭ создают на базе электронных устройств, работающих в ключевом режиме. Ключевой режим характеризуется двумя состояниями ключа: включено – отключено. Поэтому любую информацию необходимо преобразовать в цифровой двоичный код, при котором цифра каждого разряда принимает только два значения: 0 (логический нуль) и 1 (логическая единица). Это соответствует двум состояниям ключа.

Для описания логических операций используется математический аппарат, получивший название алгебры логики, или булевой алгебры в честь его создателя – ирландского ученого Джорджа Буля. Алгебра логики изучает взаимосвязь между простыми высказываниями, образующими сложные высказывания. Исходя из булевой алгебры, простое высказывание может иметь только два значения – истинное (true) или ложное (false). Одно из этих значений принимается за единицу, второе – за нуль. Уровень выходного напряжения ЛЭ зависит от уровня входного (или нескольких входных) напряжения. Эта связь отображается формулой и таблицей состояний, или таблицей истинности.

Логические операции преобразуют по определенным правилам входную информацию, обозначаемую символами $X_1, X_2, X_3, \dots, X_n$, в выходную, которую обозначим буквой F . Условные обозначения основных логических элементов показаны на рис. 10.1, таблица

истинности приведена (табл. 10.1) для двух значений входных сигналов – X_1 и X_2 .

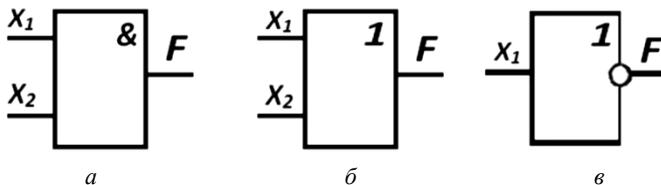


Рис. 10.1. Графические обозначения основных логических элементов (операций):

- a – элемент «И»;
- b – элемент «ИЛИ»;
- $в$ – элемент «НЕ»

Рассмотрим основные логические операции.

1. *Логическое умножение*, или операция «И», обозначается в формулах булевой алгебры знаком «*». Символически операция записывается выражением:

$$F = X_1 * X_2 * X_3 * \dots * X_n .$$

Логика срабатывания этой операции состоит в том, что на выходе ЛЭ будет сигнал «1» только в том случае, если на X_1, X_2, X_3 и т. д. входы поступят, т. е. если на входах будут все сигналы, предусмотренные в данной операции (все true), то и на выходе будет сигнал (true). При этом ложное высказывание будет истинным, если истинны все простые высказывания.

Графическое обозначение операции – рис. 10.1, a .

2. *Логическое сложение*, она же операция «ИЛИ», обозначается знаком «+». Символически операция записывается следующим выражением:

$$F = X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n .$$

Логика срабатывания этой операции состоит в том, что на выходе ЛЭ «ИЛИ» будет сигнал «1» в том случае, если на его входы X_1 или X_2 , или X_3 и т. д. поступит хотя бы один сигнал «1» из всех предусмотренных. Другими словами, сложное высказывание будет истинным (true), если истинно хотя бы одно из простых высказываний, и ложным (false), если ложны (false) все простые высказывания. Графическое обозначение операции – рис. 10.1, b .

3. *Логическое отрицание (инверсия)*, или «НЕ», обозначается чертой над входной (входными) переменной. Символически записывается:

$$F = \overline{X}.$$

На схемах условное обозначение этой логической операции – кружочек на выходе прямоугольника (рис. 10.1, в). Смысл этой операции состоит в том, что на выходе этого ЛЭ сигнал будет лишь в том случае, если на входе сигнала нет. Если на входе есть сигнал, то на выходе он отсутствует. Это простое отрицание, которое используется сравнительно редко.

Гораздо чаще используется операция «НЕ» в сочетании с операциями «И» или «ИЛИ». Рассмотрим такие составные операции.

4. *Отрицание логического умножения*, или операция «И-НЕ». Графическое обозначение операции – рис. 10.2, а. Символически операция записывается выражением:

$$F = \overline{X_1 * X_2 * X_3 * \dots * X_n}$$

Логика срабатывания операции «И-НЕ» заключается в том, что сигнал на выходе этого ЛЭ будет в том случае, если отсутствует сигнал хотя бы на одном входе. Эта операция известна также под названием «штрих Шеффера», образует сложное высказывание из простых по следующему правилу: сложное высказывание истинно, если ложно хотя бы одно из простых высказываний, и ложно, если все простые высказывания истинны (см. табл. 10.1).

На входы ЛЭ при любой логической операции подается вполне определенное количество входных сигналов, поэтому и в символикe записи это находит отражение. Например, если на входы подаются два сигнала, то получим «2И-НЕ», если три сигнала, то «3И-НЕ», или символьно:

$$F = \overline{X_1 * X_2}, F = \overline{X_1 * X_2 * X_3} \text{ соответственно и так далее.}$$

5. *Отрицание логического сложения*, или операция «ИЛИ-НЕ». Графическое обозначение операции – рис. 10.2, б. Символически операция записывается выражением:

$$F = \overline{X_1 + X_2 + X_3 + \dots + X_n}.$$

Смысл этой операции состоит в том, что на выходе этого устройства сигнал будет лишь в том случае, если нет сигналов на его входах. Если появится сигнал хотя бы на одном входе ЛЭ, реализующего операцию «ИЛИ-НЕ», то на выходе сигнала не будет. Операция «ИЛИ-НЕ» называется также «стрелкой Пирса», образует сложное высказывание, составленное из простых в соответствии со следующим правилом: сложное высказывание истинно лишь в том случае, когда ложны все образующие его простые высказывания, и ложно, если истинно хотя бы одно из простых высказываний (см. табл. 10.1).

На входы ЛЭ при любой логической операции подается вполне определенное количество входных сигналов, поэтому и в символической записи это находит отражение. Например, если на входы подаются два сигнала, то получим: «2ИЛИ-НЕ», если три сигнала, то «3ИЛИ-НЕ», или символично $F = \overline{X_1 + X_2}$, $F = \overline{X_1 + X_2 + X_3}$ соответственно и так далее.

Таблица 10.1

Таблица истинности двухразрядных логических элементов

X_1	X_2	F			
		«И»	«ИЛИ»	«2И-НЕ»	«2ИЛИ-НЕ»
0	0	0	0	1	1
0	1	0	1	1	0
1	0	0	1	1	0
1	1	1	1	0	0

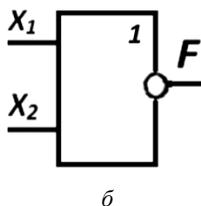
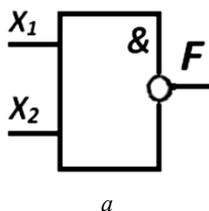


Рис. 10.2. Графические обозначения составных логических элементов (операций):

- a* – элемент «И-НЕ»;
- б* – элемент «ИЛИ-НЕ»

ЛЭ выполняются чаще всего на основе интегральных микросхем (ИМС) определенной серии, например, К155.

В данной лабораторной работе исследуются логические элементы «2И-НЕ» (К155ЛА3) и «2ИЛИ-НЕ» (К155ЛЕ1), условные обозначения которых показаны на рис. 10.2, *a* и *б*, соответственно.

На основе этих базовых ЛЭ могут быть созданы комбинационные логические устройства, выполняющие операции любой сложности. В комбинационных устройствах сигнал на выходе F определяется комбинацией входных сигналов X_1, X_2, X_3, \dots .

Пусть требуется создать комбинационную схему с тремя входами X_1, X_2, X_3 и одним выходом F . Высокий уровень напряжения на выходе должен появляться только при высоких уровнях на входах X_1 и X_2 , т. е. $F = 1$ при $X_1 = X_2 = 1$ и $X_3 = 0$.

Любую комбинационную схему можно составить путем подбора элементов. В данном случае, если использовать ЛЭ с двумя входами, а именно «2И-НЕ» и «2ИЛИ-НЕ», то она будет содержать не менее четырех входов. Три входа необходимы для входных величин X_1, X_2, X_3 и один вход можно использовать для связи между ЛЭ.

Так как схема должна реагировать на появление одинаковых высоких уровней (или импульсов) X_1 и X_2 , то эти входы следует объединить ЛЭ «2И-НЕ». На его выходе получим низкий уровень при наличии $X_1 = X_2 = 1$.

Следовательно, второй ЛЭ должен давать на выходе высокий потенциал $F = 1$ только при поступлении на его входы двух низких уровней, т. е. при отсутствии сигналов на его двух входах. Поэтому таким вторым элементом схемы является ЛЭ «2ИЛИ-НЕ» (рис. 10.3).

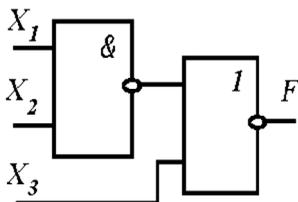


Рис. 10.3. Простейшее комбинационное устройство на основе логических элементов

При большом числе входов такой метод подбора трудоемок. Более рационально составление уравнения логической функции и последующие ее декомпозиция и оптимизация по правилам булевой алгебры, или алгебры логики. Для данного случая представление операции выразится формулой

$$F = \overline{((X_1 * X_2) + X_3)}.$$

Многие комбинационные устройства, встречающиеся в цифровой вычислительной технике (шифраторы, дешифраторы, сумматоры), представляют собой готовые ИМС. В данной работе используется четырехразрядный сумматор, выполненный на микросхеме К155ИМЗ, структурная схема которого показана на рис. 10.4. Состоит он из четырех одноразрядных сумматоров SM . Каждый одноразрядный сумматор имеет три входа: два входа A и B для ввода двух суммируемых чисел одного разряда и вход P -перенос, на который поступает сигнал с выхода предыдущего разряда как результат сложения в нем чисел. На выходе S появляется сигнал, соответствующей сумме двух чисел двоичного кода, а на выходе P – сигнал переноса, если в результате сложения получается двухзначное число. Например, необходимо сложить два двоичных четырехразрядных числа – $A = 0101$ (десятичное число 5) и $B = 1001$ (9). На входы сумматора поступят $A_0 = 1$ и $B_0 = 1$, в результате получится в двоичном коде $1 + 1 = 10$ (в десятичном коде 2). Поэтому на выходе $S_0 = 0$, а $P = 1$. На входы второго сумматора поступят $A_1 = 0$, $B_1 = 0$, $P = 1$. На выходе получится единица в этом разряде $S_1 = 1$ и $P = 0$, т. е. в следующий разряд нуль переносится. На третьем сумматоре $A_2 = 1$, $B_2 = 0$ и $P = 0$. В результате получится $S_2 = 1$, $P = 0$ (табл. 10.2).

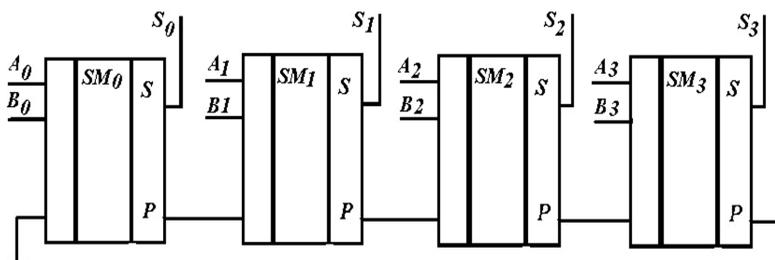


Рис. 10.4. Схема четырехбитного сумматора

Пример результатов опыта сумматора

Числа	Двоичный код	Десятичный код
<i>A</i>	0 1 0 1	5
<i>B</i>	1 0 0 1	9
<i>A+B</i>	1 1 1 0	14

Сумматор с большим числом разрядов объединяет несколько простых.

Программа работы и порядок ее выполнения

1. Исследовать ЛЭ «2И» и «2НЕ», для чего на входы X_1 и X_2 этих элементов поочередно подать напряжения логической единицы и нуля от источников через переключатели $SA_1 \dots SA_8$. Для индикации уровня выходного напряжения выход элемента F соединить с одним из индикаторов $ML_1 \dots ML_5$. Составить и заполнить таблицу истинности (табл. 10.3).

2. Исследовать ЛЭ «2И-НЕ» и «2ИЛИ-НЕ» аналогичным образом. Результаты также записать в табл. 10.3.

Таблица 10.3

Опыт логических элементов

X_1	X_2	$F = X_1 + X_2$	$F = X_1 * X_2$	$F = \overline{X_1 + X_2}$	$F = \overline{X_1 * X_2}$
0	0				
0	1				
1	0				
1	1				

3. Собрать на стенде электрическую схему описанного в пособии комбинационного устройства (рис. 10.3), обеспечивающего выходной сигнал $F = 1$ только при наличии двух входных сигналов $X_1 = X_2 = 1$, если третий сигнал входной $X_3 = 0$. Проверить ее работу, подав на входы X_1, X_2, X_3 входные сигналы, и включить на выход индикатор F . Перебрать все возможные комбинации входных сигналов и результаты свести в табл. 10.4.

Таблица 10.4

Опыт комбинационного устройства

X_1	X_2	X_3	F	X_1	X_2	X_3	F
0	0	0		1	0	0	
0	0	1		1	0	1	
0	1	0		1	1	0	
0	1	1		1	1	1	

2. Собрать на стенде электрическую схему четырехразрядного сумматора, собранного на одной микросхеме типа К155ИМ3, для чего на входы $A_0...A_3$ и $B_0...B_3$ подать сигнал от источника через ПК $SA_1...SA_8$, а вход CR подключить к «земле» (\downarrow). С выходов сумматора S_0, S_1, S_2, S_3 и CRP подать сигналы на индикаторы $ML_1...ML_5$.

Каждому студенту бригады необходимо взять два четырехразрядных числа (табл. 10.5) в двоичной системе (в десятичной системе это означает, что числа должны быть не больше 15) и осуществить их суммирование.

Таблица 10.5

Соответствие четырехразрядных двоичных чисел десятичным числам

Двоичный код	Десятичное число	Двоичный код	Десятичное число	Двоичный код	Десятичное число
0000	0	0110	6	1011	11
0001	1	0111	7	1100	12
0010	2	1000	8	1101	13
0011	3	1001	9	1110	14
0100	4	1010	10	1111	15
0101	5			10000	16

Полученные результаты всей бригады записать в табл. 10.6.

Таблица 10.6

Результаты опыта сумматора

Числа	Десятичный код	Двоичный код	Числа	Десятичный код	Двоичный код
A			A		
B			B		
$A+B$			$A+B$		

Содержание отчета:

1. Название и цель работы.
2. Программа работы и порядок ее выполнения, включая схемы и формулы.
3. Результаты экспериментального исследования в виде таблиц.
4. Осциллограммы напряжения для исследуемых типов выпрямителей.
5. Сравнительная оценка полученных результатов и выводы.

Вопросы для самоконтроля:

1. Назначение и области применения логических элементов (ЛЭ).
2. Основные логические операции и их реализация.
3. Что представляют собою потенциальные и импульсные ЛЭ?
4. Назначение и работа ЛЭ «И-НЕ», «ИЛИ-НЕ».
5. Что такое комбинационные устройства?
6. Схема и работа комбинационных устройств при различных входных сигналах.
7. Что такое сумматор?

ПРИЛОЖЕНИЯ

**Основные условные обозначения
измерительных механизмов приборов**

Наименование системы и преобразователя	Условное обозначение	
	Обычный измерительный механизм	Логометрический измерительный механизм
Магнитоэлектрический прибор с подвижной рамкой		
Магнитоэлектрический прибор с подвижным магнитом		
Электромагнитный прибор		
Электромагнитный поляризованный прибор		—
Электродинамический прибор		
Ферродинамический прибор		
Индукционный прибор		
Электростатический прибор		—
Тепловой прибор (с нагреваемой провоолокой)		—

Приложение 2

Условные обозначения особенностей работы
электроизмерительных приборов

Значение данного обозначения	Условное обозначение
Приборы предназначены для работы в цепи:	
только постоянного тока	
постоянного и переменного токов	
только однофазного переменного тока	
трехфазного тока	
Прибор нормально работает при:	
вертикальном положении шкалы	
горизонтальном положении шкалы	
наклонном положении шкалы	
Измерительная цепь изолирована от корпуса и испытана напряжением, например, 2 кВ	
Прибор испытанию изоляции не подлежит	
Защита от внешних магнитных полей	
Защита от внешних электрических полей	
<i>Внимание!</i> См. дополнительные указания в паспорте и инструкциях по эксплуатации	
<i>Осторожно!</i> Прочность изоляции измерительной цепи по отношению к корпусу не соответствует нормам (знак выполнен красным)	

**Буквенные обозначения и единицы основных величин
в электротехнике**

Наименование величины	Обозначения		Единицы	
	главные	запасные	наименование	обозначение
<i>l</i>	2	3	4	5
Время	<i>t</i>	–	секунда	С
Емкость электрическая	<i>C</i>	–	фарада	Ф
Заряд электрический	<i>Q</i>	–	кулон	Кл
Индуктивность	<i>L</i>	–	генри	Гн
Индуктивность взаимная	<i>M</i>	<i>L_{mn}</i>	генри	Гн
Индукция магнитная	<i>B</i>	–	тесла	Тл
Коэффициент мощности при синусоидальном напряжении и токе	cos φ	–	–	–
КПД	η	–	–	–
Коэффициент трансформации	<i>k_T</i>	–	–	–
Коэффициент трансформации трансформатора напряжения	<i>k</i>	<i>k_U</i>		
Коэффициент трансформации трансформатора тока	<i>k</i>	<i>k_I</i>		
Мощность				
активная	<i>P</i>	–	ватт	Вт
реактивная	<i>Q</i>	<i>P_a</i>	вольт-ампер реактивный	Вар
полная	<i>S</i>	<i>P_S</i>	вольт-ампер	ВА
Напряжение электрическое	<i>U</i>	–	вольт	В
Напряженность магнитного поля	<i>H</i>	–	ампер на метр	А/м
Период колебаний электрической или магнитной величины	<i>T</i>	–	секунда	с
Постоянная магнитная	μ ₀	–	генри на метр	Гн/м
Постоянная электрическая	ε ₀	–	фарада на метр	Ф/м

Окончание приложения 3

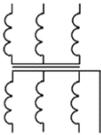
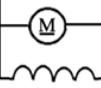
1	2	3	4	5
Потенциал электрический	ϕ	–	вольт	В
Поток магнитный	Φ	–	вебер	Вб
Потокоцепление	Ψ	–	вебер	Вб
Проводимость				
электрическая активная	G	g	сименс	См
электрическая полная	Y	y	сименс	См
реактивная	B	b	сименс	См
Проницаемость				
диэлектрическая абсолютная	ϵ_a	ϵ	фарада на метр	Ф/м
диэлектрическая относительная	ϵ_r	–		
магнитная абсолютная	μ_a	μ	генри на метр	Гн/м
магнитная относительная	μ_r	–	–	–
Плотность тока	J	–	ампер на квадратный метр	А/м ²
Разность электрических потенциалов	U	–	вольт	В
Сдвиг фаз между напряжением и током	ϕ	–	градус	°
Сила электродвижущая (ЭДС)	E	–	вольт	В
Скольжение	s	–	–	–
Сопротивление электрическое				
постоянному току	R	r	ом	Ом
активное	R	r	ом	Ом
полное	Z	–	ом	Ом
реактивное	X	x	ом	Ом
Ток	I	–	ампер	А

Приложение 4

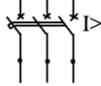
**Обозначения условные графические и буквенные
в электрических схемах**

Наименование	Обозначение	
	графическое	буквенное
<i>I</i>	2	3
Постоянный ток	—	
Полярность постоянного тока		
положительная	+	
отрицательная	—	
Переменный ток	~	
Переменный ток частотой 50 Гц	~50 Гц	
Трехфазный ток частотой 50 Гц, напряжением 220 В	3N~50Гц 220В	
Трехфазный ток, четырехпроводная линия (три провода, нейтраль) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	3N~50Гц 220/380 В	
Резистор постоянный		<i>R</i>
Резистор постоянный с дополнительными отводами		<i>R</i>
Шунт измерительный		<i>R</i>
Резистор переменный		<i>R</i>
Терморезистор		<i>RK</i>
Варистор		<i>RU</i>
Потенциометр		<i>R</i>
Конденсатор постоянной емкости		<i>C</i>
Конденсатор постоянной емкости электролитический		<i>C</i>

Продолжение приложения 4

1	2	3
Конденсатор переменной емкости		<i>C</i>
Вариконд		<i>C</i>
Катушка индуктивности		<i>L</i>
Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом		<i>L</i>
Трансформатор однофазный двухобмоточный с ферромагнитным сердечником		<i>TV</i>
Автотрансформатор с ферромагнитным сердечником		<i>TV</i>
Измерительный трансформатор тока		<i>TA</i>
Трансформатор трехфазный с ферромагнитным магнитопроводом двухобмоточный с соединением обмоток «звезда»–«звезда» с выведенной нейтральной точкой		<i>TV</i>
Генератор постоянного тока со смешанным возбуждением		<i>G</i>
Синхронный генератор трехфазный с обмотками, соединенными в звезду, с невыведенной нейтралью		<i>G</i>
Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением		<i>M</i>
Асинхронный двигатель трехфазный, соединенный в треугольник, с короткозамкнутым ротором		<i>M</i>
Амперметр		<i>PA</i>
Вольтметр		<i>PV</i>
Ваттметр		<i>PW</i>
Счетчик активной энергии		<i>PI</i>

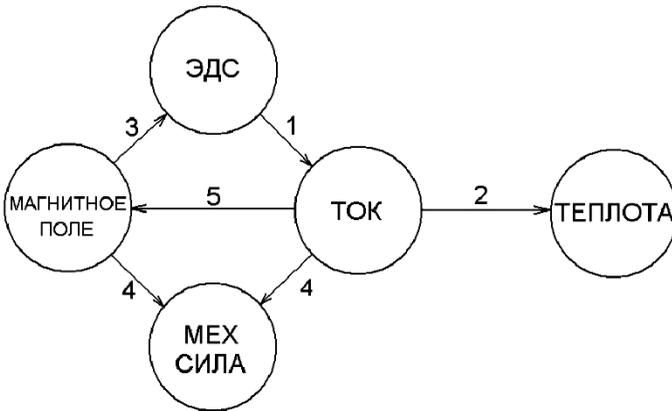
Окончание приложения 4

1	2	3
Частотомер		<i>PF</i>
Фазометр		
Омметр		<i>PR</i>
Гальванометр		
Осциллограф		
Контакт коммутационного устройства		<i>QS</i>
закрывающий		
открывающий		<i>QS</i>
переключающий с нейтральным центральным положением		<i>SA</i>
Разъединитель трехполюсный		<i>QS</i>
Контакт выключателя замыкающий трехполюсный с автоматическим срабатыванием максимального тока		<i>QF</i>
Переключатель однополюсный шестипозиционный		<i>SA</i>
Предохранитель плавкий		<i>FU</i>

Основные формулы и уравнения электротехники

Мощность	$p = ui$
Энергия	$W = \int uidt$
Энергия магнитного поля катушки	$W_{\text{маг}} = \frac{Li^2}{2}$
Энергия электрического поля конденсатора	$W_{\text{эл}} = \frac{Cu^2}{2}$

Связи электрических величин (причины и следствия)



Закон Ома	$i = \frac{u}{R}$
Закон Джоуля–Ленца	$p = i^2 R$
Закон электромагнитной индукции	$e = -\frac{d\Phi}{dt}$
Закон Ампера	$\vec{F} = \vec{B}i\vec{l}$
Закон полного тока	$\sum HI = \sum IW$

Соотношения между током и напряжением на элементах электрической цепи

Элемент цепи	Вид тока			
	Переменный ток, мгновенное значение	Синусоидальный ток		Постоянный ток
		комплексное значение	действующее значение	
R	$u = iR$ $i = \frac{u}{R}$	$\dot{U} = \dot{I}R$ $\dot{i} = \frac{\dot{U}}{R}$	$U = IR$ $I = \frac{U}{R}$	$U = IR$ $I = \frac{U}{R}$
L	$u_L = L \frac{di}{dt}$ $i = \frac{1}{L} \int u_L dt$	$\dot{U} = j\omega L \dot{I}$ $\dot{i} = \frac{\dot{U}}{j\omega L}$	$U = \omega L I$ $I = \frac{U}{\omega L}$	Индуктивность не оказывает сопротивления постоянному току
C	$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ $i = C \frac{du_C}{dt}$	$\dot{U} = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}$ $\dot{I} = j\omega C \dot{U}$	$U = \frac{1}{\omega C} I$ $I = \omega C U$	Емкость представляет собой разрыв цепи для постоянного тока

**Закон Ома
в комплексной форме для цепи синусоидального тока:**

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}}; \quad \dot{i} = \frac{\dot{U}}{R + j(\omega L - \frac{1}{\omega C})} = \frac{\dot{U}}{R + j(X_L - X_C)}$$

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

Основной:

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2014. – 702 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. – 11-е изд., испр. и доп. – М. : Юрайт, 2014. – 318 с.
3. Касаткин, А. С. Электротехника : учебник / А. С. Касаткин. – 10-е изд., перераб. – М. : Академия, 2007. – 544 с.
4. Китунович, Ф. Г. Электротехника : учебное пособие / Ф. Г. Китунович, С. Д. Зинчук. – Минск : Техноперспектива, 2004. – 357 с.
5. Прянишников, В. А. Электроника : полный курс лекций / В. А. Прянишников. – 5-е изд. – СПб. ; М. : КОРОНАпринт : Бином-Пресс, 2006. – 416 с.
6. Игумнов, Д. В. Основы полупроводниковой электроники : учебное пособие / Д. В. Игумнов, Г. П. Костюнина. – М. : Горячая линия. – Телеком, 2005. – 392 с.
7. Гальперин, М. В. Электронная техника : учебник / М. В. Гальперин. – 2-е изд., испр. и доп. – М. : ФОРУМ-ИНФРА-М, 2014. – 352 с.
8. Миловзоров, О. В. Электроника : учебник / О. В. Миловзоров, И. Г. Панков. – 4-е изд., стереотип. – М. : Высш. школа, 2008. – 288 с.
9. Бобровников, Л. З. Электроника : учебник для вузов / Л. З. Бобровников. – СПб. : Питер, 2004. – 560 с.
10. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника : учебник / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – М. : Высш. школа, 2008 – 800 с.
11. Дудников, И. Л. Основы электроники, микропроцессорной техники и техники связи : конспект лекций / И. Л. Дудников, И. П. Матвеевко. – Минск : БГАТУ, 2004. – 124 с.

Дополнительной:

12. Электротехника и электроника : методические указания к лабораторным работам по курсу / сост.: Е. В. Зайцев, И. И. Скочек. – Минск : БГАТУ, 2007. – 137 с.

13. Теоретические основы электротехники : методические указания к практическим занятиям : в 3 ч. / сост.: В. С. Корко [и др.] – Минск : БГАТУ, 2003. – Ч. 1. – 137 с.

14. Ибрагим, К. Ф. Основы электронной техники : элементы, схемы, системы / К. Ф. Ибрагим; пер. с англ. В. М. Матвеева, Г. Ф. Хохлова, Ф. Г. Хохлова. – 2-е изд. – М. : Мир, 2001. – 400 с.

15. Арестов, К. А. Основы электроники и микропроцессорной техники / К. А. Арестов. – М. : Колос, 2001. – 216 с.

16. Лачин, В. И. Электроника / В. И. Лачин, Н. С. Савелов. – Ростов н/Д : Феникс, 2000. – 448 с.

17. Бабич, Н. П. Основы цифровой схемотехники : учебное пособие / Н. П. Бабич, И. А. Савелов. – М. : Издат. Дом «Додека-XXI», 2007. – 480 с.

18. Угрюмов, Е. П. Цифровая схемотехника / Е. П. Угрюмов. – СПб. : БХВ-СПб., 2000. – 528 с.

Технические нормативные правовые акты

19. ГОСТ 2.702–75 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Правила выполнения электрических схем. Введ. 01.07.77. – М. : Изд-во стандартов, 1977. – 20 с.

20. ГОСТ 2.710–81 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. Введ. 31.03.81. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 10 с.

21. ГОСТ 2.770–73 ЕСКД. Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения условные графические. Приборы полупроводниковые. Введ. 16.08.73. – М. : Изд-во стандартов, 1981. – 15 с.

22. ГОСТ 2.743–91 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения условные графические в схемах. Элементы цифровой техники. Введ. 23.12.91. – М. : Изд-во стандартов, 1993. – 64 с.

23. ГОСТ 2.759–82 Единая система конструкторской документации (ЕСКД). Обозначения условные графические в схемах. Элементы аналоговой техники. Введ. 01.07.83. – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 7 с.

24. ГОСТ 19.701–90 Единая система программной документации (ЕСЛД). Схема алгоритмов, программ, данных и систем. Условные обозначения и правила выполнения. Введ. 26.12.90. – М. : Изд-во стандартов, 1999. – 22 с.

Учебное издание

**ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ И ЭЛЕКТРОНИКИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ**

Учебно-методическое пособие

Составители:

Мириленко Андрей Петрович,
Зайцев Евгений Валерьевич,
Курочкин Василий Александрович и др.

Ответственный за выпуск *В. А. Ковалев*

Редактор *Г. В. Анисимова*

Корректор *Г. В. Анисимова*

Компьютерная верстка *К. М. Корольчука*

Дизайн обложки *К. М. Корольчука*

Подписано в печать 23.09.2021. Формат 60×84¹/₁₆.

Бумага офсетная. Ризография.

Усл. печ. л. 6,74. Уч.-изд. л. 5,27. Тираж 200 экз. Заказ 179.

Издатель и полиграфическое исполнение:

Учреждение образования

«Белорусский государственный аграрный технический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,

распространителя печатных изданий

№ 1/159 от 09.06.2014.

№ 2/151 от 11.06.2014.

Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.