

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Рекомендовано Учебно-методическим объединением по аграрному техническому образованию в качестве учебно-методического пособия для студентов учреждений высшего образования по специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства (по направлениям) и направлению специальности 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство)

В трех частях

Часть 3

**Трехфазные цепи. Переходные процессы
в электрических цепях. Переменное электромагнитное поле**

Минск
БГАТУ
2015

УДК 621.3(07)
ББК 31.21я7
Т33

Составители:

кандидат технических наук, доцент *А. В. Крутов*,
старший преподаватель *Т. Ф. Гузанова*,
старший преподаватель *М. А. Бойко*,
ассистент *С. С. Нефедов*

Рецензенты:

кафедра «Электротехника и электроника»
Белорусского национального технического университета;
заведующий лабораторией научного обеспечения испытаний
и информационно-технических технологий Республиканского унитарного
предприятия «Научно-практический центр Национальной академии наук
Беларуси по механизации сельского хозяйства»,
кандидат технических наук, доцент *В. К. Клыбик*

**Теоретические основы электротехники. Лабораторный
практикум** : учебно-методическое пособие. В 3-х ч. Ч. 3. Трех-
фазные цепи. Переходные процессы в электрических цепях.
Переменное электромагнитное поле / сост.: А. В. Крутов [и др.].
– Минск : БГАТУ, 2015. – 72 с.
ISBN 978-985-519-725-7.

Содержит материал для проведения лабораторных работ по разделу «Трехфазные цепи» с учетом различных схем соединения, неоднородной нагрузки, определения симметричных составляющих трехфазной системы электрических величин. Представлены методические указания по исследованию переходных процессов в электрических цепях, поверхностного эффекта в переменном электромагнитном поле.

Для студентов, обучающихся по специальности 1-74 06 05 Энергетическое обеспечение сельского хозяйства и направлению специальности 1-53 01 01-09 Автоматизация технологических процессов и производств (сельское хозяйство).

УДК 621.3(07)
ББК 31.21я7

ISBN 978-985-519-725-7 (ч. 3)
ISBN 978-985-519-701-1

© БГАТУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	5
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ.....	7
Лабораторная работа № 1. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКА ЗВЕЗДОЙ.....	9
Лабораторная работа № 2. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКА ТРЕУГОЛЬНИКОМ.....	18
Лабораторная работа № 3. ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ НЕОДНОРОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ ФАЗ ПРИЕМНИКА.....	25
Лабораторная работа № 4. СИММЕТРИЧНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТОКОВ.....	31
Лабораторная работа № 5. ЗАРЯДКА И РАЗРЯДКА КОНДЕНСАТОРА	40
Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	47
Лабораторная работа № 7. РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА НА КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ И РЕЗИСТОР.....	55
Лабораторная работа № 8. ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ НА АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА.....	61
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	66
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	67

ПРЕДИСЛОВИЕ

Лабораторный практикум составлен в соответствии с учебной программой курса «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) и включает в себя работы по разделам «Однофазные электрические цепи синусоидального тока», «Электрические цепи периодических несинусоидальных токов», «Электрические цепи с распределенными параметрами» и «Нелинейные цепи переменного тока». В описании каждой работы содержится ее цель, общие теоретические сведения, методика исследования, рекомендации по подготовке к выполнению задания и оформлению отчета, контрольные вопросы. Общие сведения по теории, которые приведены в начале каждой работы, не ставят целью заменить учебные пособия по курсу ТОЭ. Материалы изложены кратко, применительно к содержанию лабораторной работы. Для полного изучения темы студент обязан обратиться к учебникам и учебным пособиям, список которых приведен в конце издания.

В лабораторном практикуме использованы методические разработки научно-педагогических работников, ветеранов кафедры электротехники Г. А. Сапуна и Э. Л. Кочетовой.

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 электрических цепей и электромагнитного поля.

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

К каждому очередному лабораторному занятию необходимо изучить описание лабораторной работы и соответствующий теоретический материал по конспекту лекций и учебным пособиям. Электрические схемы и таблицы для записи наблюдений должны быть подготовлены заранее.

Перед началом выполнения каждой работы проводится проверка готовности студентов к ней. В случае неподготовленности студент к работе не допускается.

Прежде чем собирать электрическую цепь, следует ознакомиться с находящимся на рабочем месте оборудованием, выяснить его назначение, параметры каждого элемента цепи, а для приборов – пределы измерений, род тока и цену деления шкалы. При наличии на рабочем месте автотрансформаторов типа ЛАТР и реостатов следует установить в начальное положение их движки, чтобы после включения электрической цепи напряжение и ток в ней были минимальными. После этого необходимо собрать электрическую цепь.

Сборку сложной электрической цепи рекомендуется начинать с последовательно соединенных элементов и приборов, а затем подключать параллельные ветви как самой электрической цепи, так и приборов.

Каждая собранная электрическая цепь, а также произведенные в ней изменения должны быть проверены преподавателем или лаборантом и только с их разрешения цепь может быть включена под напряжение. Во время выполнения лабораторных работ студенты должны строго выполнять правила техники безопасности и соблюдать дисциплину. Лица, нарушающие правила техники безопасности, отстраняются от выполнения работы. К ним по ходатайству кафедры могут применяться меры дисциплинарного воздействия.

Проводя те или иные испытания, необходимо стремиться получить достоверные результаты. Следует помнить, что небрежность в снятии показаний приборов и записях обычно приводит к ошибкам, неправильным выводам о свойствах испытуемой цепи. При наличии грубых ошибок в испытаниях опыт или вся лабораторная работа должны быть проведены повторно.

При выполнении работы бригадой студенты должны распределить обязанности между собой и периодически ими меняться. При этом все должны активно вникать в смысл проводимых испытаний, уметь собирать электрические схемы, определять цену деления прибора.

После окончания каждого опыта необходимо ознакомить с результатами замеров преподавателя и только с его разрешения разбирать электрическую цепь. По завершении лабораторных занятий необходимо оборудование и приборы аккуратно составить на рабочем месте, а провода, перемычки убрать со стола и сложить в установленное преподавателем место. После этого приступают к оформлению отчета.

Отчет по проведенной работе оформляется каждым студентом. Он должен содержать следующее: название работы, ее цель; электрические схемы цепей, исследованных в данной работе; заполненные таблицы, графики или иные результаты всех проведенных опытов; расчетные формулы и результаты вычислений; анализ результатов и выводы.

Отчеты оформляются на специальных бланках или в обычной тетради аккуратно, с использованием чертежных принадлежностей и с соблюдением стандартных графических и буквенных 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 по проведенной работе должен быть защищен студентом в конце занятия или перед началом следующей работы. В противном случае студент, не отчитавшийся за две работы, не допускается к выполнению следующей. Пропущенные лабораторные занятия по уважительным или неуважительным причинам должны быть отражены в период, согласованный с преподавателем, с разрешения деканата.

ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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

В лаборатории ТОО применяются номинальные фазные и линейные напряжения 127, 220 В. Опасными являются напряжения выше 36 В, а также ЭДС самоиндукции при размыкании цепей с индуктивностями, напряжение неразряженных конденсаторов. Кроме того, при неправильных действиях с электрическим оборудованием, неверно собранных электрических схемах возможны короткие замыкания и перегрузки в цепях, что приводит к выходу из строя приборов, элементов цепи, повреждению изоляции, расплавлению токопроводящих частей оборудования, его перегреву. Брызги расплавленного металла опасны ожогом открытых участков тела, а возникшая электрическая дуга поражает органы зрения.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности:

1. Не допускать загромождения рабочего места личными вещами. Не отвлекаться. Во время лабораторных занятий мобильные телефоны должны быть отключены.

2. Прежде чем собирать цепь, необходимо убедиться, что сетевой выключатель отключен и сигнальная лампа на стенде не горит.

3. При сборке электрической цепи соединения проводниками следует выполнять так, чтобы они не ложились на шкалы приборов, имели наименьшее число пересечений между собой и были надежно присоединены, обеспечивая хороший контакт. Все неиспользованные проводники должны быть сложены отдельно, убраны со стола.

4. Включение цепи под напряжение разрешается только после проверки правильности соединений преподавателем или лаборантом.

5. Во время работы нужно быть внимательным и осторожным, находиться на рабочем месте и не допускать к нему посторонних. Каждый включающий цепь под напряжение должен предупредить о

своим действием остальных членов бригады.

6. При обнаружении каких-либо неисправностей (повышенный шум, искрение, перегрев обмоток или проводов, отсутствие свечения сигнальной лампы) или при попадании кого-нибудь под напряжение нужно немедленно отключить выключатель и пригласить преподавателя.

7. Во время работы не касаться неизолированных частей электрических цепей, находящихся под напряжением.

8. Все изменения в цепи проводятся при отключенном выключателе. После этого цепь должен проверить преподаватель или лаборант. При выходе студентов на перерыв электрическая цепь должна быть отключена от источника питания.

9. После окончания работы необходимо показать преподавателю результаты замеров и только после этого разобрать цепь, привести в порядок рабочее место (сложить провода, составить приборы, стулья).

10. За порчу лабораторного оборудования, вызванную небрежным обращением с ним или невыполнением требований данного руководства, студенты несут моральную и дисциплинарную ответственность.

Лабораторная работа № 1

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКА ЗВЕЗДОЙ

1. Цель работы

Экспериментальное исследование трехфазной цепи при соединении приемника звездой и выявление роли нейтрального провода.

2. Общие сведения

Соединение приемников электрической энергии звездой является распространенным видом соединения в трехфазных цепях.

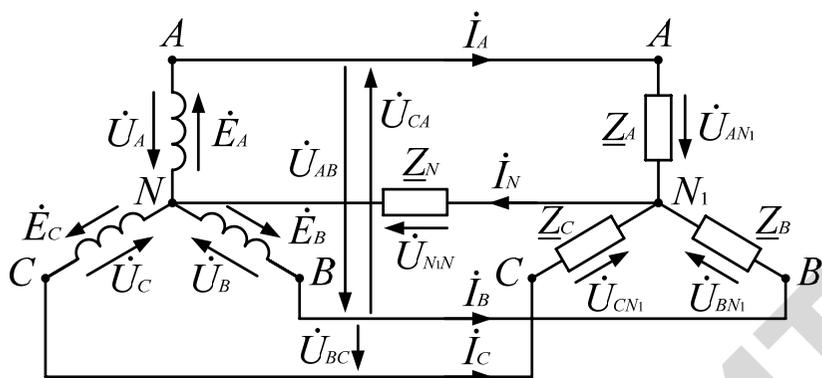


Рис. 1.1. Трехфазная электрическая цепь при соединении генератора и приемника звездой с нейтральным проводом

Различают соединение звездой с нейтральным проводом и без нейтрального провода.

Три провода, идущие от начала фаз генератора к приемнику, называются линейными проводами, а провод, соединяющий нейтральные точки генератора N и приемника N_1 , называется нейтральным проводом (рис. 1.1).

Лучи звезды приемника называют фазами приемника.

Трехфазный приемник называют симметричным, если комплексные сопротивления всех фаз одинаковы, в противном случае приемник несимметричен.

При соединении звездой в линейном проводе и в одноименной фазе приемника протекает один и тот же ток, то есть линейный ток равен фазному: $I_{л} = I_{ф}$.

Напряжения между линейными проводами \dot{U}_{AB} , \dot{U}_{BC} , \dot{U}_{CA} называются линейными напряжениями. Напряжения на фазах (обмотках) источника электрической энергии \dot{U}_{AN} , \dot{U}_{BN} , \dot{U}_{CN} называются фазными напряжениями генератора и их принято обозначать \dot{U}_A , \dot{U}_B , \dot{U}_C . Напряжения на фазах приемника электрической энергии \dot{U}_{AN_1} , \dot{U}_{BN_1} , \dot{U}_{CN_1} называются фазными напряжениями приемника.

Трехфазные электрические генераторы создают симметричную систему фазных напряжений, то есть они равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° (рис. 1.2).

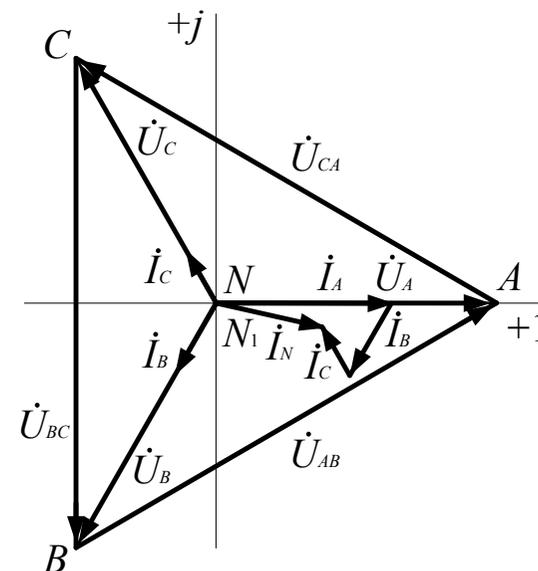


Рис. 1.2. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов при несимметричном приемнике, сопротивления фаз активные, $Z_N = 0$

$$\dot{U}_A = U_A, \quad \dot{U}_B = \dot{U}_A e^{-j120^\circ}, \quad \dot{U}_C = \dot{U}_A e^{j120^\circ}.$$

Линейные напряжения равны разности соответствующих фазных напряжений, например, $\dot{U}_{AB} = \dot{U}_A - \dot{U}_B$. Линейное напряжение больше фазного напряжения генератора в $\sqrt{3}$ раз: $U_{л} = \sqrt{3}U_{\phi}$.

При наличии нейтрального провода, сопротивлением \underline{Z}_N которого можно пренебречь ($\underline{Z}_N = 0$), каждая фаза приемника непосредственно соединена с соответствующей фазой генератора (рис. 1.1) и напряжения на фазах приемника будут такие же, как и на фазах генератора: $\dot{U}_{AN_1} = \dot{U}_A$, $\dot{U}_{BN_1} = \dot{U}_B$, $\dot{U}_{CN_1} = \dot{U}_C$, то есть равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° . Поэтому соединение звездой с нейтральным проводом используют при несимметричном приемнике, например, для подключения бытовых потребителей (электролампы, однофазные электродвигатели и др.).

Токи в фазах приемника находят по закону Ома:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_{AN_1}}{\underline{Z}_A}; \quad \dot{I}_B = \frac{\dot{U}_{BN_1}}{\underline{Z}_B}; \quad \dot{I}_C = \frac{\dot{U}_{CN_1}}{\underline{Z}_C}.$$

Ток в нейтральном проводе находят по первому закону Кирхгофа:

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

При отсутствии нейтрального провода ($\underline{Z}_N = \infty$) и при несимметричном приемнике между нейтральными точками приемника и генератора появляется напряжение \dot{U}_{N_1N} . Это напряжение можно рассчитать по формуле

$$\dot{U}_{N_1N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C},$$

где $\underline{Y}_A, \underline{Y}_B, \underline{Y}_C$ – проводимости фаз приемника.

Напряжения на фазах приемника находят по второму закону Кирхгофа:

$$\dot{U}_{AN_1} = \dot{U}_A - \dot{U}_{N_1N}; \quad \dot{U}_{BN_1} = \dot{U}_B - \dot{U}_{N_1N}; \quad \dot{U}_{CN_1} = \dot{U}_C - \dot{U}_{N_1N}.$$

Топографическая диаграмма для одного из возможных случаев несимметрии приемника представлена на рис. 1.3.

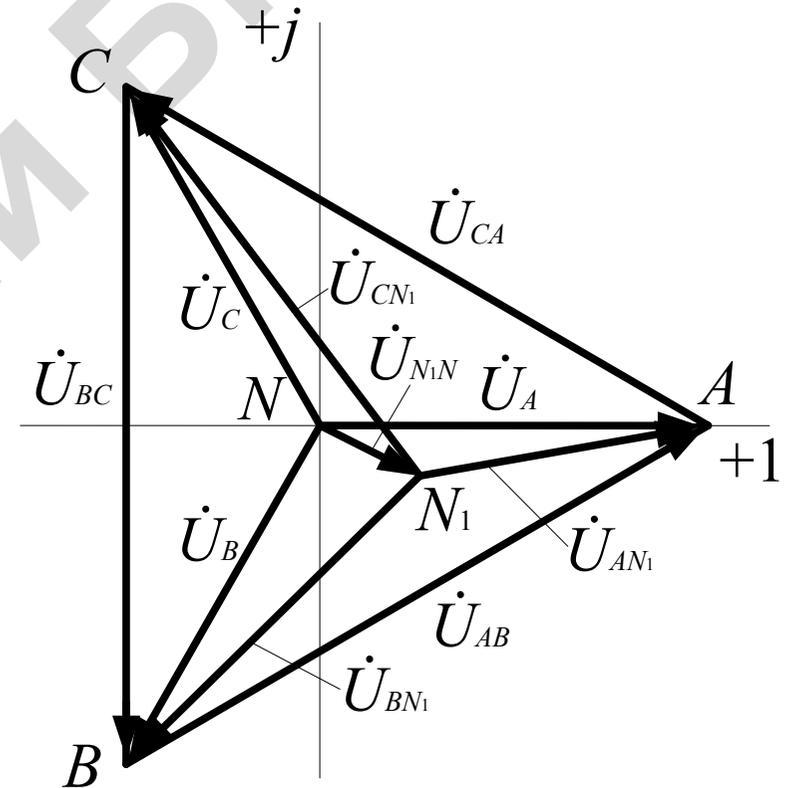


Рис. 1.3. Топографическая диаграмма напряжений при несимметричном приемнике без нейтрального провода, $\underline{Z}_N = \infty$

Из топографической диаграммы напряжений хорошо видно, что при отсутствии нейтрального провода в трехфазной цепи с несим-

метричным приемником напряжения на фазах приемника оказываются разными по величине. Поскольку все потребители рассчитаны на определенное напряжение, то и повышение напряжения, и его снижение нарушают нормальную работу потребителя.

Основным назначением нейтрального провода с весьма малым сопротивлением Z_N является сведение к нулю напряжения между нейтральными точками приемника и генератора:

$$\dot{U}_{N_1N} = \dot{I}_N Z_N = \dot{I}_N \cdot 0 = 0.$$

В этом случае напряжения на фазах приемника будут равны напряжениям на фазах генератора. Между фазными и линейными напряжениями приемника сохраняется равенство $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$.

Очевидно, что при симметричном режиме, то есть при одинаковых комплексных сопротивлениях в фазах приемника, токи фаз будут равны по величине и сдвинуты по фазе на угол 120° и, следовательно, сумма их комплексных значений будет равна 0. Поэтому при симметричном приемнике (трехфазные электродвигатели, электропечи и др.) нет необходимости в нейтральном проводе. Напряжения на фазах симметричного приемника равны напряжениям на фазах генератора и при отсутствии нейтрального провода, так как $\dot{U}_{N_1N} = 0$.

Между фазными и линейными напряжениями симметричного приемника сохраняется равенство $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$.

Трехфазный приемник соединяют звездой в том случае, когда его фазы рассчитаны на напряжение в $\sqrt{3}$ раз меньшее линейного напряжения линии электропередачи. При этом несимметричный приемник подключают к четырехпроводной линии электропередачи (с нейтральным проводом). Для симметричного трехфазного приемника нейтральный провод не требуется.

3. Описание лабораторной установки

Исследуемая трехфазная цепь содержит приемник, каждая фаза которого представляет собой набор резисторов.

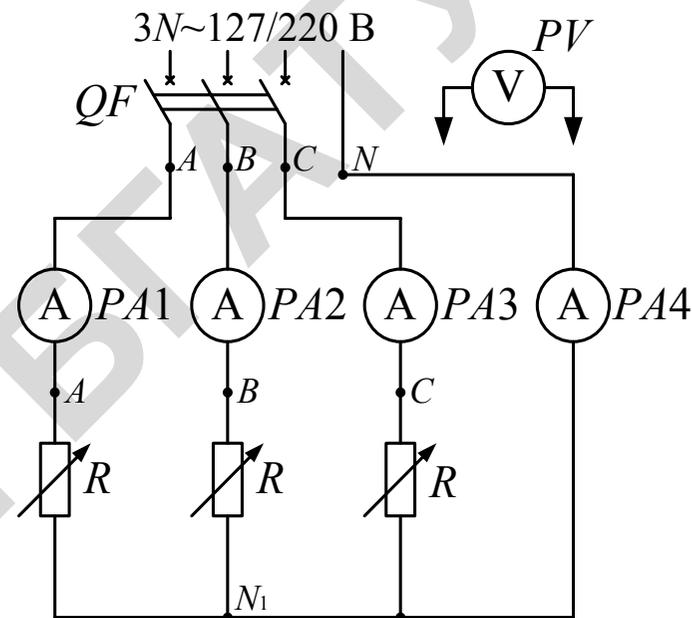


Рис. 1.4. Электрическая схема для исследования трехфазной цепи при соединении приемника звездой:
 PA1, PA2, PA3 – амперметры; PA4 – амперметр 1 А, с зеркальной шкалой;
 V – вольтметр 150-300 В

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 1.4. Измерить и записать в табл. 1.1 линейные и фазные напряжения на входе цепи (на генераторе).

Таблица 1.1

Линейные и фазные напряжения на входе цепи

Измерено						Вычислено		
U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_A	U_B	U_C	$\frac{U_{AB}}{U_A}$	$\frac{U_{BC}}{U_B}$	$\frac{U_{CA}}{U_C}$

4.2. Измерить токи и напряжения на приемнике.

Таблица 1.2

**Напряжения и токи приемника, соединенного звездой
с нейтральным проводом**

Приемник	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{AN_1}	U_{BN_1}	U_{CN_1}	I_A	I_B	I_C	I_N
	В	В	В	В	В	В	А	А	А	А
Симметричный. Включить все резисторы в фазах										
Обрыв фазы приемника. В одной фазе (по указанию преподавателя) отключить все резисторы										
Несимметричный. Включить разное число резисторов в фазах										

4.3. Отключить нейтральный провод.

4.4. Измерить токи и напряжения на приемнике, изменяя сопротивление фаз приемника в соответствии с табл. 1.3.

Таблица 1.3

**Напряжения и токи приемника, соединенного звездой
без нейтрального провода**

Приемник	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_{AN_1}	U_{BN_1}	U_{CN_1}	I_A	I_B	I_C	I_{N_1}
	В	В	В	В	В	В	А	А	А	А
Симметричный										
Обрыв фазы приемника										
Несимметричный										
Короткое замыкание фазы приемника (см. примечание)										

Примечание. При включении цепи с коротким замыканием пригласить преподавателя. Для короткого замыкания фазы приемника необходимо проводом соединить начало и конец фазы приемника, например, зажимы A и N_1 , при этом сопротивление фазы становится равным нулю. В закороченную фазу включить амперметр на 2 А, вместо одноамперного. В фазах включить все резисторы.

4.5. По опытным данным табл. 1.1 найти отношения линейного и фазного напряжений на входе цепи. Построить топографическую диаграмму напряжений на входе цепи.

4.6. По опытным данным табл. 1.2 и 1.3 для всех пунктов построить в масштабе топографические диаграммы напряжений и векторные диаграммы токов.

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

Топографическая диаграмма представляет собой диаграмму комплексных потенциалов точек схемы, причем каждой точке схемы соответствует определенная точка на топографической диаграмме. Напряжение между двумя любыми точками электрической схемы изображается вектором, соединяющим соответствующие точки диаграммы.

Точку схемы, потенциал которой принят равным нулю, на топографической диаграмме помещают в начало координат. Для трехфазной электрической цепи это нейтральная точка генератора N .

Построение топографических диаграмм напряжений для всех пунктов таблиц 1.1, 1.2 и 1.3 следует начинать с симметричной системы фазных и линейных напряжений на входе цепи (табл. 1.1) так, как это показано на рис. 1.2. Рекомендуемый масштаб $m_u = 50$ В/см. Концы векторов напряжений $\dot{U}_A, \dot{U}_B, \dot{U}_C$ соответствуют потенциалам точек A, B, C схемы (см. рис. 1.4).

При наличии нейтрального провода точка N_1 (на диаграмме будет совпадать с точкой N , так как потенциалы этих точек одинаковы).

При отсутствии нейтрального провода положение точка N_1 на топографической диаграмме в общем случае нужно искать методом засечек. Из вершины A проводится окружность радиусом U_{AN_1} , из вершины B – радиусом U_{BN_1} , а из вершины C – радиусом U_{CN_1} . Точка пересечения окружностей есть точка N_1 . Её соединяют с точ-

ками A, B, C диаграммы так, как показано на рис. 1.3, и получают векторы фазных напряжений приемника $\dot{U}_{AN_1}, \dot{U}_{BN_1}, \dot{U}_{CN_1}$.

В случае обрыва или короткого замыкания фазы приемника в цепи без нейтрального провода положение точки N_1 на диаграмме можно найти более простыми способами.

При обрыве фазы две другие фазы оказываются соединены последовательно и подключены к линейному напряжению. Если сопротивления фаз одинаковы, то напряжения на них будут равны половине линейного, а точка N_1 на диаграмме будет находиться на середине вектора соответствующего линейного напряжения. Например, при обрыве фазы A точка N_1 будет находиться на середине вектора \dot{U}_{BC} .

При отсутствии нейтрального провода и коротком замыкании, например, фазы A приемника, потенциал нейтральной точки N_1 становится равным потенциалу точки A . На диаграмме точка N_1 совпадает с точкой A . Аналогичное явление произойдет при коротком замыкании фаз B или C . При этом на закороченной фазе напряжение равно 0, а на двух других фазах приемника напряжения равны линейным.

Векторы токов в фазах $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ рисуются на всех диаграммах выходящими из точки N_1 и совпадающими по фазе с соответствующими фазными напряжениями приемника, так как сопротивления всех фаз чисто активные. Рекомендуемый масштаб для тока $m_i = 50 \text{ A/cm}$.

Вектор тока \dot{I}_N находится из соотношения $\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C$.

В режиме короткого замыкания фазы A вектор тока \dot{I}_A находится из условия $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, откуда $\dot{I}_A = -(\dot{I}_B + \dot{I}_C)$. Аналогично можно найти положение векторов тока \dot{I}_B или \dot{I}_C при коротком замыкании фазы B или C .

6. Контрольные вопросы

1. В каком случае трехфазный приемник соединяют звездой и как это соединение выполняется?
2. Дайте определение фазы трехфазной системы.

3. Какие напряжения называют линейными и какие фазными? Каково соотношение между линейными и фазными напряжениями генератора, если его обмотки соединены звездой?

4. Какие токи называют линейными и какие фазными? Каково соотношение между линейным и фазным током при соединении звездой?

5. Что значит симметричный и что значит несимметричный трехфазный приемник?

6. В каких случаях используются соединения приемника звездой без нейтрального провода и в каких случаях с нейтральным проводом?

7. В чем состоит назначение нейтрального провода?

8. Приведите примеры симметричных и несимметричных потребителей.

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПРИЕМНИКА ТРЕУГОЛЬНИКОМ

1. Цель работы

Экспериментальное исследование трехфазной цепи при соединении приемника треугольником.

2. Общие сведения

Чтобы соединить фазы (обмотки) генератора или приемника треугольником нужно конец первой фазы (обмотки) соединить с началом второй, конец второй – с началом третьей и конец третьей – с началом первой. Линейные провода присоединяют к точкам соединения двух фаз друг с другом (рис. 2.1). Фазы приемника имеют сопротивления Z_{AB}, Z_{BC}, Z_{CA} . Система линейных напряжений $\dot{U}_{AB}, \dot{U}_{BC}$, подводимая к приемнику от источника электрической энергии, обычно симметрична. Это значит, что все напряжения равны по величине и сдвинуты между собой по фазе на 120° (рис. 2.2).

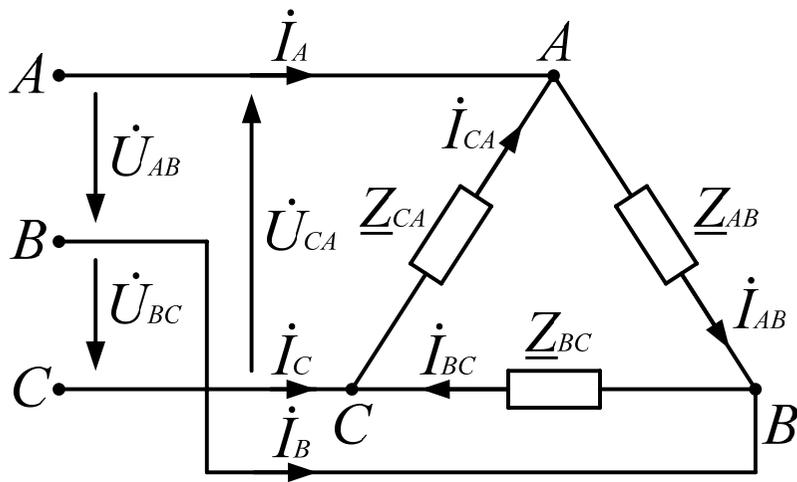


Рис. 2.1. Трехфазная электрическая цепь при соединении приемника треугольником

При соединении приемника треугольником его фаза включена между двумя линейными проводами, фазное напряжение приемника равно линейному: $U_{\phi} = U_{л}$.

Токи в фазах приемника находят по закону Ома:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}}; \quad \dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}}; \quad \dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}}.$$

Линейные токи определяют через фазные токи по первому закону Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{I}_A &= \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}. \end{aligned}$$

На рис. 2.2 приведены векторные диаграммы напряжений и токов при симметричном приемнике, сопротивления фаз активные.

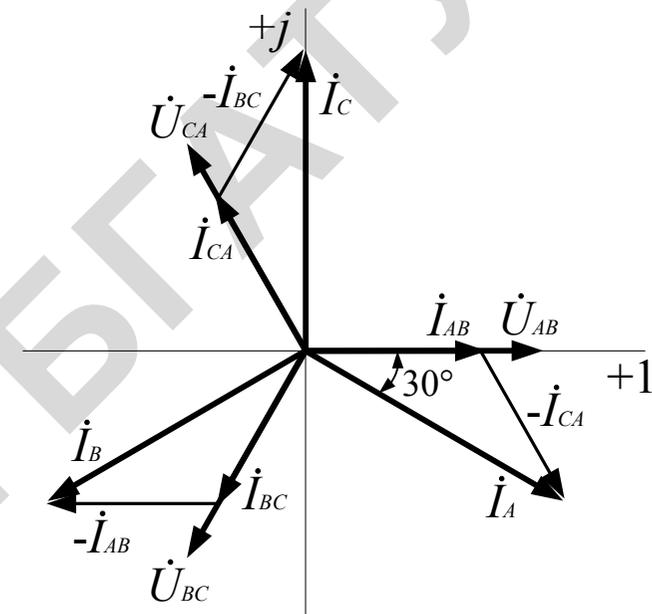


Рис. 2.2. Векторные диаграммы напряжений и токов при соединении треугольником, симметричном приемнике с активным сопротивлением фаз

По векторной диаграмме можно доказать, что при симметричном приемнике $I_{л} = \sqrt{3}I_{\phi}$. При несимметричном приемнике векторы фазных токов будут неодинаковые по величине и в общем случае сдвинуты относительно своих напряжений на разные углы. Соответственно и линейные токи получают аналогичные изменения. Напряжения на фазах приемника остаются одинаковыми по величине, в этом преимущество соединения приемника треугольником.

Трехфазный приемник соединяют треугольником, если его фазы рассчитаны на напряжение, равное линейному напряжению линии электропередачи.

3. Описание лабораторной установки

Исследуемая трехфазная цепь содержит приемник, каждая фаза которого представляет собой набор резисторов.

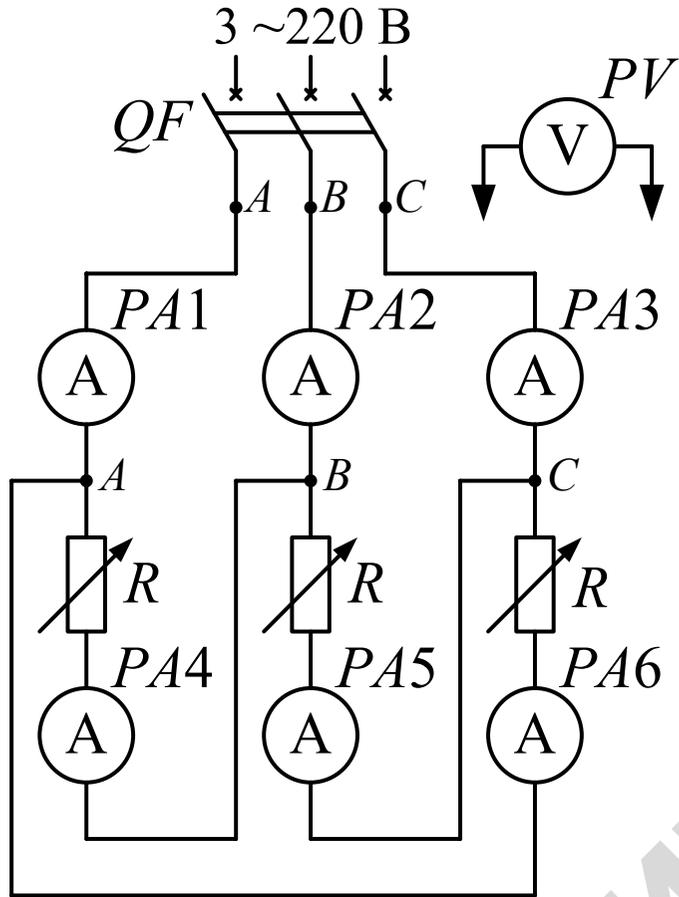


Рис. 2.3. Электрическая схема для исследования трехфазной цепи при соединении приемника треугольником:
 PA1, PA2, PA3 – амперметры, 2 А; PA4, PA5, PA6 – амперметры, 1 А;
 PV – вольтметр, 150-300 В

4. Программа и методика выполнения работы

- 4.1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 2.3.
- 4.2. Измерить токи и напряжения при режимах цепи, указанных в табл. 2.1. Напряжения необходимо измерять на клеммах приемника.

Напряжения и токи при соединении приемника треугольником

Режим цепи	U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}
Симметричный. Включить все резисторы в фазах									
Обрыв фазы приемника. Отключить все резисторы в одной из фаз по указанию преподавателя									
Несимметричный. Включить разное число резисторов в фазах									
Обрыв линии. Отключить один из линейных проводов по указанию преподавателя. В фазах включить все резисторы									

- 4.3. По данным замеров построить в масштабе векторные диаграммы напряжений и токов для первых трех пунктов табл. 2.1, топографическую диаграмму напряжений и векторную диаграмму токов для последнего пункта таблицы.

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

Векторные диаграммы напряжений для всех режимов цепи, за исключением обрыва линии, будут представлять симметричную систему линейных напряжений, такую же, как на рис. 2.2. Рекомендуемый масштаб $m_u = 40$ В/см.

Векторы фазных токов проводят из начала координат совпадающими по фазе с соответствующими напряжениями, так как сопротивления всех фаз чисто активные. Рекомендуемый масштаб $m_i = 0,4$ А/см.

Положение векторов линейных токов находится по разности соответствующих фазных токов: $\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$; $\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$; $\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$.

При обрыве линейного провода одна из фаз приемника будет находиться под прежним линейным напряжением. Две другие фазы окажутся соединены последовательно. Если сопротивления этих фаз равны, то на каждой из них будет половина линейного напряжения. Например, при обрыве линейного провода A трехфазный приемник находится под действием линейного напряжения \dot{U}_{BC} (см. рис. 2.1). На каждое из последовательно соединенных сопротивлений фаз AB и CA приходится половина линейного напряжения \dot{U}_{BC} . На топографической диаграмме (рис. 2.4, *a*) точка A располагается на середине отрезка « BC ».

На векторной диаграмме токов (рис. 2.4, *б*) векторы фазных токов совпадают по направлению с векторами соответствующих фазных напряжений, а векторы линейных токов определены через фазные по первому закону Кирхгофа.

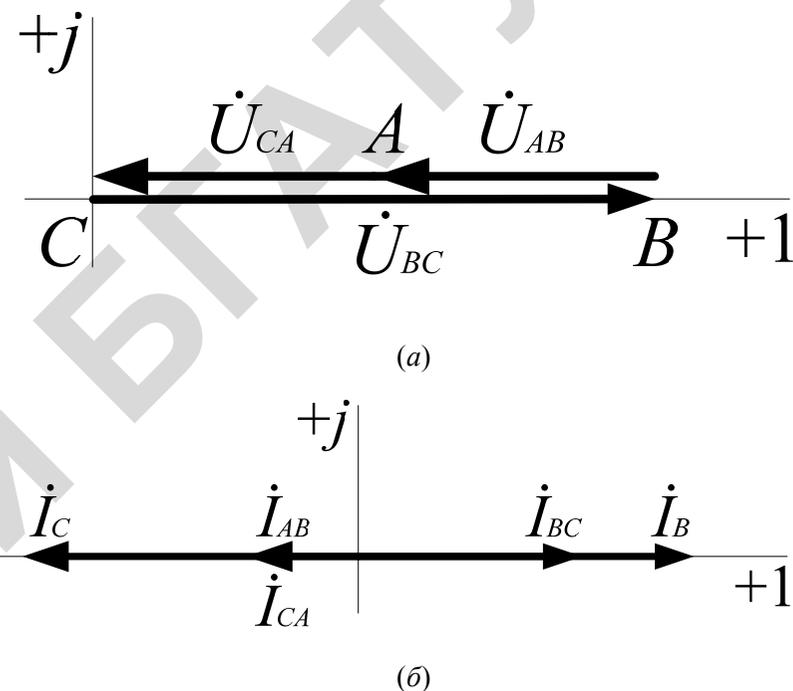


Рис. 2.4. Топографическая диаграмма напряжений (*a*) и векторная диаграмма токов (*б*) при обрыве линии A , сопротивления фаз активные

6. Контрольные вопросы

1. Напишите соотношения между фазными и линейными токами и напряжениями для случая соединения приемника треугольником при симметричной нагрузке.
2. Каким образом выполняют соединение фаз приемника треугольником?
3. В каком случае фазы приемника соединяют треугольником?
4. Какие преимущества соединения треугольником перед соединением звездой.
5. При соединении треугольником каким образом определяют линейный ток при симметричном и несимметричном режимах?

Лабораторная работа № 3

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ НЕОДНОРОДНЫХ СОПРОТИВЛЕНИЯХ ФАЗ ПРИЕМНИКА

1. Цель работы

Целью работы является исследование значений фазных напряжений приемника, соединенного звездой без нейтрального провода, при неоднородных сопротивлениях фаз.

2. Общие сведения

На фазах несимметричного трехфазного приемника, соединенного звездой без нейтрального провода, напряжения несимметричны. Это объясняется тем, что между нейтральной точкой приемника и нейтральной точкой генератора возникает напряжение \dot{U}_{N_1N} , величина и фаза которого зависят от соотношения проводимостей фаз приемника:

$$\dot{U}_{N_1N} = \frac{\dot{U}_A \underline{Y}_A + \dot{U}_B \underline{Y}_B + \dot{U}_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C}.$$

Рассмотрим случай, когда проводимости фаз приемника равны по величине, но различны по своему характеру, т. е. неоднородны. Допустим, что трехфазный приемник состоит из двух равных активных проводимостей $\underline{Y}_B = \underline{Y}_C = \frac{1}{R} = g$ и равной им по величине реактивной проводимости $\underline{Y}_A = j\omega c = jb$, где $b = g$ (рис. 3.1, а).

Напряжение между нейтральной точкой приемника и нейтральной точкой генератора

$$\dot{U}_{N_1N} = \frac{\dot{U}_A jb + \dot{U}_A e^{-j120^\circ} g + \dot{U}_A e^{j120^\circ} g}{2g + jb} = \dot{U}_A \frac{j + e^{-j120^\circ} + e^{j120^\circ}}{2 + j} = \dot{U}_A (-0,2 + j0,6).$$

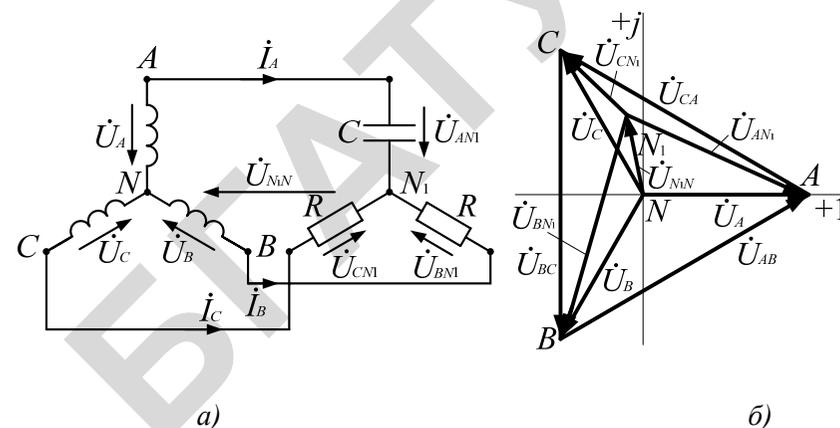


Рис. 3.1. Схема трехфазной электрической цепи с неоднородными сопротивлениями фаз приемника (а) и её топографическая диаграмма напряжений (б)

Конец вектора \dot{U}_{N_1N} определяет положение точки N_1 на топографической диаграмме (рис. 3.1, б). Как видно из диаграммы, напряжения на одинаковых активных сопротивлениях в фазах В и С оказываются неодинаковы, напряжение \dot{U}_{BN_1} значительно больше напряжения \dot{U}_{CN_1} .

Если в фазы В и С включить две одинаковые лампы накаливания, то лампа в фазе В будет гореть ярче, чем в фазе С. Такая схема может быть использована в качестве указателя последовательности фаз симметричной трехфазной системы ЭДС.

Фазоуказатель подключают к трехфазной линии, питающейся от трехфазного генератора. Если фазу, к которой подключен конденсатор, принять – за фазу А, то фаза с ярко горящей лампой есть фаза В, а фаза с тускло горящей лампой – фаза С.

Если вместо конденсатора в фазу А включить индуктивную катушку, то соотношение фазных напряжений приемника изменится на обратное: напряжение \dot{U}_{BN_1} будет меньше напряжения \dot{U}_{CN_1} .

Если меняется величина (модуль) сопротивления одной из фаз трехфазной цепи от 0 до ∞ , причем характер этого сопротивления отличается от характера сопротивлений двух других фаз, то гео-

метрическим местом концов вектора напряжения \dot{U}_{N_1N} является дуга окружности.

При неоднородных сопротивлениях фаз напряжение \dot{U}_{N_1N} может принимать сколь угодно большие значения, поэтому фазные напряжения приемника могут превысить по величине линейные напряжения.

3. Описание лабораторной установки

Для исследования трехфазной цепи с неоднородными сопротивлениями фаз приемника, соединенного звездой без нейтрального провода, на лабораторном стенде предусмотрены фазоуказатель (рис. 3.2, а), набор конденсаторов (рис. 3.2, б), трехфазный резистивный приемник (рис. 3.2, в).

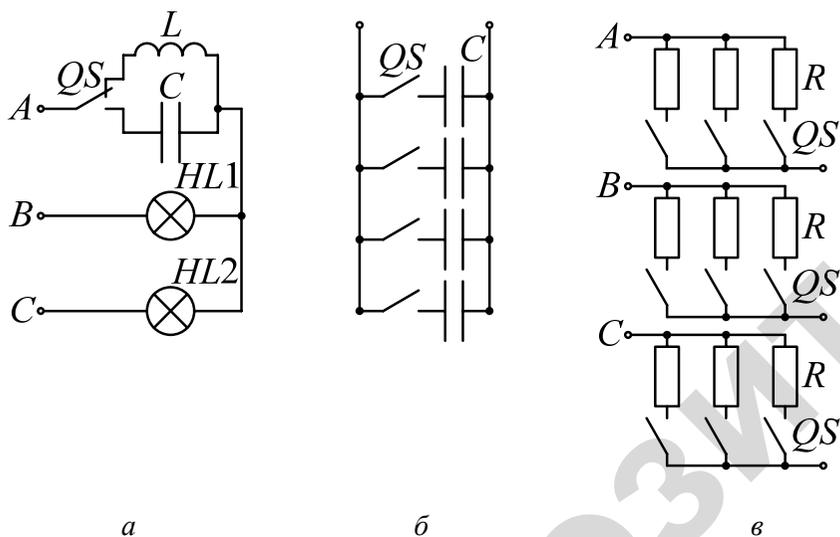


Рис. 3.2. Элементы трехфазной цепи с неоднородными сопротивлениями фаз приемника: а – фазоуказатель; б – набор конденсаторов; в – трехфазный резистивный приемник

Приемники включаются в трехфазную цепь с линейным напряжением 220 В.

Для измерения напряжений потребителя предусмотрен переносной многопредельный вольтметр на 150...300 В.

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Составить схему включения фазоуказателя в трехфазную цепь, представить ее для проверки преподавателю и включить в отчет.

4.2. Включить фазоуказатель в трехфазную цепь с линейным напряжением 220 В. Измерить и записать в табл. 3.1. значения напряжений на входе цепи (на генераторе).

4.3. Измерить линейные и фазные напряжения фазоуказателя для двух сопротивлений фазы А: 1) емкостном; 2) индуктивном. Отметить для обоих случаев, в какой фазе лампа горит ярче.

Таблица 3.1

Напряжения на входе цепи					
$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$U_A, В$	$U_B, В$	$U_C, В$

Данные занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Напряжения фазоуказателя							
Сопротивление фазы А	$U_{AB}, В$	$U_{BC}, В$	$U_{CA}, В$	$U_{AN1}, В$	$U_{BN1}, В$	$U_{CN1}, В$	Ярко горящая лампа
Емкостное							
Индуктивное							

4.4. Составить схему трехфазной цепи с приемником, соединенным звездой. В фазе А приемника должна быть включена переменная емкость, в фазах В и С – постоянные активные сопротивления в виде набора резисторов. В схеме следует предусмотреть амперметры для измерения фазных токов, в фазе А – на 2 А, в фазах В и С

– на 1 А. Схему представить для проверки преподавателю и привести ее в отчете.

4.5. Собрать электрическую цепь, по составленной схеме п. 4.3. В фазах *B* и *C* включить все резисторы. Меняя емкость батареи конденсаторов в фазе *A* от 0 (все конденсаторы отключены) до ∞ (клеммы батареи конденсаторов замкнуты накоротко проводом) через 10 мкФ, измерить напряжения и токи, результаты записать в табл. 3.3 (всего произвести не менее 7 замеров).

Примечание. При включении цепи с коротким замыканием необходимо пригласить преподавателя. Для замыкания конденсаторов накоротко необходимо отключить цепь, конденсаторы разрядить и после этого замкнуть их проводом.

Таблица 3.3

Значения напряжений и токов приемника при изменении емкостного сопротивления фазы *A*

<i>C</i> , мкФ	U_{AB} , В	U_{BC} , В	U_{CA} , В	U_{AN_1} , В	U_{BN_1} , В	U_{CN_1} , В	I_A , А	I_B , А	I_C , А

4.6. По данным табл. 3.2 построить на одном рисунке топографические диаграммы напряжений электрической цепи с фазоуказателем. Положение точки N_1 для обоих пунктов таблицы 3.2 найти методом засечек.

4.7. По данным табл. 3.3 построить на одном рисунке топографические диаграммы напряжений для различных значений емкости в фазе *A*. Положение точки N_1 при изменении сопротивления фазы *A* найти методом засечек.

На этом же рисунке нанести кривую положения точек N_1 при изменении емкости фазы *A* от 0 до ∞ и построить векторные диаграммы токов для первого ($C = 0$), последнего ($C = \infty$) и одного из промежуточных замеров.

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

Построение топографических диаграмм, как для анализа работы фазоуказателя, так и для анализа изменений фазных напряжений приемника при изменении емкости фазы *A* от 0 до ∞ , следует начинать с симметричной системы фазных и линейных напряжений на входе цепи (табл. 3.1) так, как это показано на рис. 3.1, б. Рекомендуемый масштаб $m_u = 30$ В/см.

Положение точки N_1 на топографической диаграмме принято искать методом засечек. Из вершины *A* диаграммы проводится окружность радиусом U_{AN_1} , из вершины *B* – радиусом U_{BN_1} , а из вершины *C* – радиусом U_{CN_1} . Место пересечения окружностей дает положение точки N_1 на диаграмме. Точку N_1 соединяют с точками *A*, *B*, *C* диаграммы и получают векторы фазных напряжений приемника.

Векторы токов в фазах I_A , I_B , I_C по данным табл. 3.3 рисуются из точки N_1 . Причем в фазах *B* и *C* токи совпадают по фазе с соответствующими фазными напряжениями, а в фазе *A* ток опережает напряжение \dot{U}_{AN_1} по фазе на 90° , т. к. в фазе *A* включена емкость. Рекомендуемый масштаб $m_i = 0,2$ А/см. При отсутствии нейтрального провода при любой несимметрии сопротивлений в фазах приемника сумма векторов токов $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$.

6. Контрольные вопросы

1. Что означают неоднородные сопротивления фаз приемника?
2. Что представляет из себя схема фазоуказателя?
3. Что значит порядок следования или чередования фаз?
4. Каков принцип действия фазоуказателя?
5. Как рассчитать напряжения на фазах приемника при отсутствии нейтрального провода?
6. Как рассчитывается напряжение U_{N_1N} ?
7. Каково назначение фазоуказателя?

Лабораторная работа № 4

СИММЕТРИЧНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТРЕХФАЗНОЙ СИСТЕМЫ ТОКОВ

1. Цель работы

Целью работы является определение симметричных составляющих трехфазной системы токов графическим, аналитическим и опытным путем с помощью фильтра токов прямой и обратной последовательностей.

2. Общие сведения

Любую несимметричную трехфазную систему токов, напряжений или других синусоидально изменяющихся величин можно разложить на три симметричные трехфазные системы: прямой, обратной и нулевой последовательностей. Эти три симметричные системы называют симметричными составляющими несимметричной системы.

Такое разложение широко применяется при анализе несимметричных режимов работы электрических машин, трансформаторов и других электрических установок.

В несимметричной трехфазной системе токи \dot{I}_A , \dot{I}_B , \dot{I}_C различны по величине и в общем случае сдвинуты по фазе по отношению друг к другу на разные углы.

В симметричной системе прямой последовательности токи \dot{I}_{A1} , \dot{I}_{B1} , \dot{I}_{C1} равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° . В этой системе прямой порядок следования фаз – A, B, C (рис. 4.1, *a*).

В симметричной системе обратной последовательности токи \dot{I}_{A2} , \dot{I}_{B2} , \dot{I}_{C2} равны по величине и также сдвинуты на 120° , но в системе обратный порядок следования фаз – A, C, B (рис. 4.1, *б*).

В симметричной системе нулевой последовательности токи \dot{I}_{A0} , \dot{I}_{B0} , \dot{I}_{C0} равны по величине и совпадают по фазе, то есть сдвиг по фазе для этих токов равен нулю (рис. 4.1, *в*).

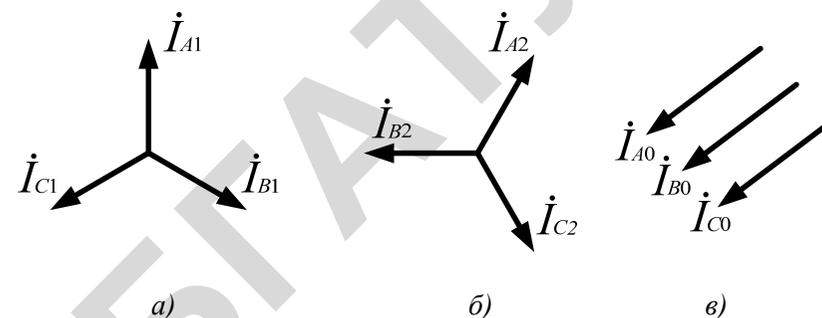


Рис. 4.1. Векторные диаграммы симметричных систем токов: прямой (*a*), обратной (*б*), и нулевой (*в*) последовательностей

Связь между токами несимметричной системы и симметричными составляющими записывается следующими уравнениями:

$$\begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{B0} + \dot{I}_{B1} + \dot{I}_{B2}; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{C0} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{C2}.\end{aligned}$$

Учитывая, что

$$\begin{aligned}\dot{I}_{A0} &= \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0}; \\ \dot{I}_{B1} &= \dot{I}_{A1} e^{-j120^\circ} = \dot{I}_{A1} e^{j240^\circ}; \quad \dot{I}_{C1} = \dot{I}_{A1} e^{j120^\circ}; \\ \dot{I}_{B2} &= \dot{I}_{A2} e^{j120^\circ}; \quad \dot{I}_{C2} = \dot{I}_{A2} e^{-j120^\circ} = \dot{I}_{A2} e^{j240^\circ},\end{aligned}$$

и обозначив $e^{j120^\circ} = a$; $e^{j240^\circ} = a^2$, получим:

$$\left. \begin{aligned}\dot{I}_A &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} + \dot{I}_{A2}; \\ \dot{I}_B &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} a^2 + \dot{I}_{A2} a; \\ \dot{I}_C &= \dot{I}_{A0} + \dot{I}_{A1} a + \dot{I}_{A2} a^2.\end{aligned}\right\} \quad (1)$$

Исходя из системы уравнений (1), можно получить следующие выражения для составляющих нулевой, прямой и обратной последовательностей тока фазы A через токи несимметричной системы:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{A0} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C); \\ \dot{I}_{A1} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a\dot{I}_B + a^2\dot{I}_C); \\ \dot{I}_{A2} &= \frac{1}{3}(\dot{I}_A + a^2\dot{I}_B + a\dot{I}_C). \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

Индекс A обычно опускают и обозначают токи прямой, обратной и нулевой последовательностей как $\dot{I}_1, \dot{I}_2, \dot{I}_0$.

Пользуясь уравнениями (2), можно найти векторы симметричных составляющих аналитически или графически.

Симметричные составляющие токов могут быть не только вычислены, но и измерены при помощи специальных электрических измерительных схем, называемых фильтрами симметричных составляющих. Эти фильтры получили широкое применение в релейной защите электроэнергетических установок.

В настоящей работе использован фильтр токов прямой и обратной последовательностей, принципиальная схема которого приведена на рис. 4.2. Покажем, что при определенных соотношениях между сопротивлениями элементов этой схемы показание амперметра будет пропорционально току прямой или обратной последовательности.

Для указанных на схеме направлений токов составим систему уравнений по двум законам Кирхгофа:

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_{ab} &= \dot{I}_a + \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_{bc} &= \dot{I}_c + \dot{I}_{ca}; \\ \dot{I}_{ab}\underline{Z}_{ab} + \dot{I}_{bc}\underline{Z}_{bc} + \dot{I}_{ca}\underline{Z}_{ca} &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

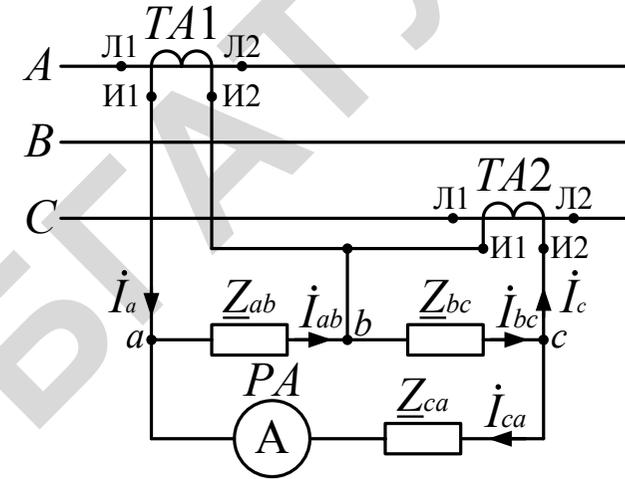


Рис. 4.2. Электрическая схема фильтра токов прямой и обратной последовательностей, TA – трансформатор тока

Исключая из последнего уравнения \dot{I}_{ab} и \dot{I}_{bc} путем подстановки их значений из первых двух уравнений, определим ток \dot{I}_{ca} , который протекает по амперметру:

$$\dot{I}_{ca} = -\frac{\dot{I}_a \underline{Z}_{ab} + \dot{I}_c \underline{Z}_{bc}}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}.$$

Приведенная схема фильтра используется в трехфазных цепях без нейтрального провода, где составляющая нулевой последовательности линейных токов заведомо равна нулю. Тогда, выражая токи \dot{I}_a и \dot{I}_c через составляющие прямой и обратной последовательностей \dot{I}_1 и \dot{I}_2 , получим:

$$\dot{I}_a = \dot{I}_1 + \dot{I}_2; \quad \dot{I}_c = a\dot{I}_1 + a^2\dot{I}_2.$$

Подставив эти значения в выражение для \dot{I}_{ca} , получим:

$$\dot{I}_{ca} = -\frac{\dot{I}_1(\underline{Z}_{ab} + a\underline{Z}_{bc}) + \dot{I}_2(\underline{Z}_{ab} + a^2\underline{Z}_{bc})}{\underline{Z}_{ab} + \underline{Z}_{bc} + \underline{Z}_{ca}}.$$

Из этого уравнения следует, что ток I_{ca} , проходящий через амперметр, не зависит от составляющей обратной последовательности и пропорционален составляющей прямой последовательности, если выполнено условие

$$\underline{Z}_{ab} + a^2\underline{Z}_{bc} = 0; \quad \underline{Z}_{ab} = -a^2\underline{Z}_{bc} = \underline{Z}_{bc}e^{j60^\circ},$$

не зависит от составляющей прямой и пропорционален составляющей обратной последовательности, если выполнено условие

$$\underline{Z}_{ab} + a\underline{Z}_{bc} = 0 \text{ или } \underline{Z}_{bc} = -a^2\underline{Z}_{ab} = \underline{Z}_{ab}e^{j60^\circ}.$$

В частности, фильтр для выделения составляющей прямой последовательности можно получить, положив

$$\underline{Z}_{bc} = R,$$

тогда

$$\underline{Z}_{ab} = Re^{j60^\circ} = \frac{1}{2}R + j\frac{\sqrt{3}}{2}R,$$

а фильтр для выделения составляющей обратной последовательности, взяв

$$\underline{Z}_{ab} = R;$$

$$\underline{Z}_{bc} = Re^{j60^\circ} = \frac{1}{2}R + j\frac{\sqrt{3}}{2}R.$$

То есть одно сопротивление фильтра должно быть активного, а второе активно-индуктивного характера.

3. Программа и методика выполнения работы

Фильтр токов прямой и обратной последовательностей, собранный на стенде, включается в трехфазную трехпроводную электрическую цепь с приемником, соединенным звездой (рис. 4.3).

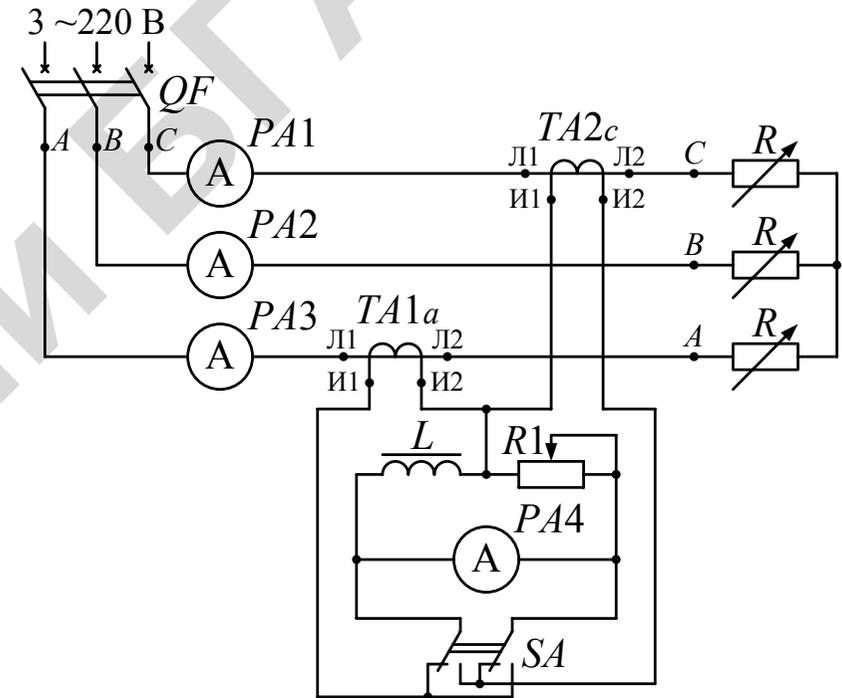


Рис. 4.3. Схема трехфазной электрической цепи с фильтром токов прямой и обратной последовательностей:

ТА – трансформатор тока; PA1, PA2, PA3 – амперметры, 1 А; PA4 – амперметр фильтра, 1 А, с зеркальной шкалой; Л1, Л2, И1, И2 – обозначения линейных и измерительных зажимов трансформатора тока; SA – переключатель для перехода от схемы фильтра тока прямой последовательности к схеме фильтра тока обратной последовательности. На стенде цифрой 1 обозначено положение переключателя

для замера тока прямой последовательности I'_1 , цифрой 2 – для замера тока

обратной последовательности I'_2 ; R_1 – переменный резистор для настройки фильтра

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме, приведенной на рис. 4.3.

4.2. При симметричной нагрузке потребителя настроить фильтр.

Для настройки фильтра переключатель SA поставить в положение, обозначенное цифрой 2 (замер тока обратной последовательности). Подобрать сопротивление переменного резистора $R1$ таким, чтобы амперметр фильтра показывал нуль. При симметричной нагрузке токи обратной последовательности отсутствуют. После настройки сопротивление переменного резистора должно оставаться неизменным.

4.3. Измерить токи в фазах приемника и токи симметричных составляющих прямой I_1 и обратной I_2 последовательностей для режимов цепи, указанных в табл. 4.1.

Таблица 4.1

Значения токов симметричных составляющих прямой и обратной последовательностей при различных режимах работы трехфазной цепи

Режим цепи	Измерено							Вычислено	
	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I'_1,$ А	$I'_2,$ А	$I_1 = K_\phi I'_1,$ А	$I_2 = K_\phi I'_2,$ А	$I_1,$ А	$I_2,$ А
Симметричный. Включить все резисторы в фазах									
Обрыв фазы. Отключить резисторы в одной из фаз по указанию преподавателя									
Несимметричный. В фазы включить разное число резисторов									

4.4. В симметричном режиме рассчитать коэффициент K_ϕ , который определяется как отношение фазного тока цепи к току прямой последовательности I'_1 , измеренному фильтром, например,

$$K_\phi = \frac{I_A}{I'_1}$$

Величина коэффициента фильтра неизменна для всех режимов цепи, так как зависит только от коэффициента трансформации трансформатора тока.

4.5. По данным замеров, пользуясь коэффициентом фильтра K_ϕ , определить значения токов прямой I_1 и обратной I_2 последовательностей, как показано в табл. 4.1.

4.6. Рассчитать токи прямой I_1 и обратной I_2 последовательностей для первых двух пунктов табл. 4.1, пользуясь уравнениями (2).

4.7. Найти графически токи I_1 и I_2 при несимметричной нагрузке по данным третьего пункта табл. 4.1, пользуясь уравнениями (2).

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

5.1. Для расчета токов I_1 и I_2 по пункту 4 задания необходимо воспользоваться уравнениями (2) из раздела 2. В эти уравнения токи $\dot{I}_A, \dot{I}_B, \dot{I}_C$ должны быть подставлены в комплексном виде, то есть с учетом их сдвига по фазе.

В симметричном режиме токи в фазах равны по величине и сдвинуты по фазе на 120° , т. е. $\dot{I}_A = I_A, \dot{I}_B = I_A e^{-j120^\circ}, \dot{I}_C = I_A e^{j120^\circ}$.

При обрыве одной фазы в трехфазной трехпроводной цепи ток этой фазы равен нулю, а токи двух других фаз равны по величине и противоположны по фазе, то есть комплексное значение тока одной фазы можно записать действительным положительным числом, а комплексное значение тока другой фазы – действительным отрицательным числом. Подставляя эти значения в уравнения (2), находим токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 в комплексном виде. Действующие значения токов I_1 и I_2 записываются в табл. 4.1 для сравнения с токами, замеренными фильтром.

5.2. Для выполнения пункта 4.7 необходимо построить в масштабе методом засечек векторную диаграмму токов. Рекомендуемый масштаб $m_i = 0,1 \text{ А/см}$.

При построении диаграммы по горизонтальной, действительной оси откладываем вектор тока \dot{I}_A (рис. 4.4). Из начала вектора тока \dot{I}_A делаем засечку радиусом, равным току \dot{I}_C , а из конца вектора тока \dot{I}_A – засечку радиусом, равным току \dot{I}_B . Точка пересечения окружностей ниже вектора \dot{I}_A определит положение вектора \dot{I}_B и \dot{I}_C , которые вместе с вектором \dot{I}_A должны образовать замкнутый треугольник, так как $\dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 0$, и иметь прямой порядок следования фаз.

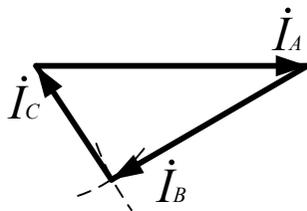


Рис. 4.4. Векторная диаграмма токов

На основании векторной диаграммы, используя уравнения (2) из раздела 2, можно найти векторы токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 графически. При графическом решении уравнений (2) следует иметь в виду, что умножение вектора на оператор $a = e^{j120^\circ}$ означает поворот этого вектора на 120° против часовой стрелки, а умножение на $a^2 = e^{-j120^\circ}$ означает поворот вектора по часовой стрелке на 120° . Значения токов I_1 и I_2 , определенных графически, записываются в табл. 4.1 для сравнения с токами, замеренными фильтром.

Контрольные вопросы

1. В чем заключается необходимость разложения несимметричных систем токов или напряжений на симметричные составляющие?

2. Почему для данной цепи не определяются токи нулевой последовательности?

3. Симметричные составляющие фазного тока какой последовательности определены в этой работе расчетом и графическим построением?

4. Как найти фазные токи, если известны их симметричные составляющие?

4. Нарисуйте в общем виде векторные диаграммы симметричных систем токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.

5. На основании графического определения симметричных составляющих постройте векторные диаграммы токов прямой и обратной последовательностей всех фаз.

6. Запишите выражения симметричных составляющих через векторы несимметричной системы.

Лабораторная работа № 5

ЗАРЯДКА И РАЗРЯДКА КОНДЕНСАТОРА

1. Цель работы

Экспериментальное исследование переходных процессов, возникающих при зарядке конденсатора и при его разрядке.

2. Общие сведения

При включении последовательно соединенных конденсатора с емкостью C и резистора с сопротивлением R на постоянное напряжение (рис. 5.1, переключатель SA в положении 1) по цепи будет проходить ток до тех пор пока конденсатор не зарядится до напряжения U . После зарядки конденсатора ток равен нулю, поскольку напряжение на конденсаторе уже не изменяется $i = C \frac{du_c}{dt} = 0$. Кон-

денсатор для постоянного тока представляет собой разрыв цепи, его сопротивление равно бесконечности.

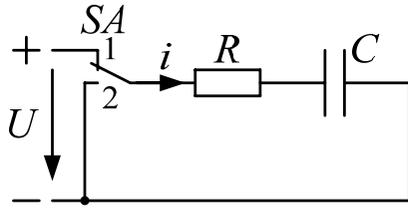


Рис. 5.1. Схема цепи R, C

Уравнение цепи согласно второму закону Кирхгофа имеет вид

$$Ri + u_C = U,$$

где u_C – переходное напряжение на конденсаторе;
 i – переходный ток.

С учетом того, что $i = C \frac{du_C}{dt}$, получим:

$$RC \frac{du_C}{dt} + u_C = U.$$

Исходя из полученного дифференциального уравнения, переходное напряжение на емкости равно сумме установившегося и свободного напряжений: $u_C = u_{cy} + u_{cсв}$.

Установившееся напряжение на емкости равно напряжению источника: $u_{cy} = U$.

Для свободной составляющей имеем однородное дифференциальное уравнение вида $RC \frac{du_{cсв}}{dt} + u_{cсв} = 0$, решение которого

$u_{cсв} = Ae^{pt}$, где A – постоянная интегрирования, а p – корень характеристического уравнения $RCp + 1 = 0$. Откуда $p = -\frac{1}{RC}$. Следова-

тельно, свободная составляющая напряжения на емкости

$u_{cсв} = Ae^{-\frac{t}{RC}} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$, где $\tau = RC$ – постоянная времени цепи R, C (измеряется в секундах). Постоянная времени τ есть время, в течение которого свободная составляющая напряжения уменьшится в $e = 2,71$ раз.

Переходное напряжение принимает вид $u_C = U + Ae^{-\frac{t}{\tau}}$.

Постоянная интегрирования A находится по начальному условию: до коммутации конденсатор не был заряжен и напряжение на нем равнялось нулю ($u_C(0-) = 0$). На основании второго закона коммутации напряжение на конденсаторе в момент коммутации будет таким же, каким оно было непосредственно перед коммутацией: $u_C(0+) = u_C(0-) = 0$, следовательно, в момент коммутации при $t = 0$ имеем $0 = U + A$, откуда $A = -U$ и, окончательно,

$$u_C = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}).$$

В свою очередь ток

$$i = C \frac{du_C}{dt} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Анализ выражений переходных напряжений и тока показывает, что напряжение на емкости с течением времени возрастает, стремясь к установившемуся значению, а ток убывает, стремясь в пределе к нулю. Кривые u_C и i имеют вид, показанный на рис. 5.2.

В момент включения конденсатора ток имеет максимальное значение

$$i_{\max} = \frac{U}{R}.$$

Убывание тока и вместе с этим возрастание напряжения на емкости происходит тем быстрее, чем меньше постоянная времени τ . Для различных моментов времени ток в цепи, выраженный в процентах от начального (максимального) значения, составляет (см. табл. 5.2).

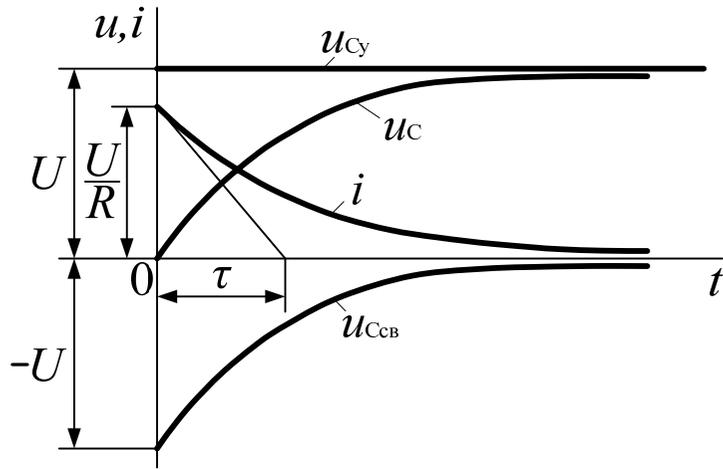


Рис. 5.2. Графики напряжений и тока при зарядке конденсатора

Таблица 5.2

Процентное выражение тока цепи от времени переходного процесса

t, c	0	τ	2τ	3τ	4τ	5τ	∞
$\frac{i}{i_{\max}} 100 \%$	100	36,8	13,5	5	1,8	0,7	0

Как видно из рис. 5.2 и приведенной выше таблицы, переходный процесс теоретически длится бесконечно долго. Практически же можно считать, что он заканчивается спустя время $t = 4 \dots 5\tau$.

Из курса математического анализа известно, что если $y = f(t)$, то подкасательная равна $\left| \frac{y}{y'} \right|$. В данном случае при любом значении t

$$\left| \frac{i}{i'} \right| = \left| \frac{u_{C\text{св}}}{u'_{C\text{св}}} \right| = \tau.$$

Последнее выражение показывает, что постоянная времени τ графически определяется длиной подкасательной к кривой тока i или $u_{C\text{св}}$ при любом значении t (например, при $t = 0$, рис. 5.2).

При разряде конденсатора (рис. 5.1, переключатель SA в положении 2) уравнение цепи имеет вид

$$Ri + u_C = 0.$$

Учитывая, что $i = C \frac{du_C}{dt}$, получим $RC \frac{du_C}{dt} + u_C = 0$.

Установившееся значение напряжения на емкости

$$u_{C\text{у}} = 0.$$

Следовательно, $u_C = u_{C\text{св}} = Ae^{-\frac{t}{RC}}$.

Пусть конденсатор был заряжен до напряжения U , тогда $u_C(0) = U = A$ и окончательно можно записать:

$$u_C = Ue^{-\frac{t}{RC}}, \quad i = C \frac{du_C}{dt} = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{RC}}.$$

Из последних выражений видно, что при коротком замыкании цепи R, C напряжение на конденсаторе и ток постепенно убывают до нуля, причем ток изменил направление в сравнении с указанным на рис. 5.1. Кривые u_C и i имеют вид, показанный на рис. 5.3.

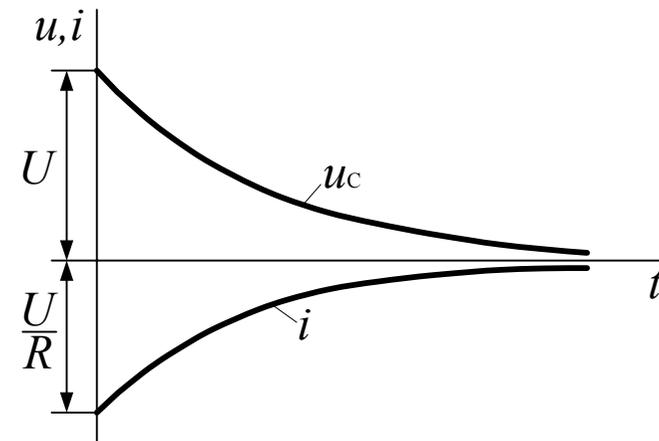


Рис. 5.3. Графики напряжения и тока при разрядке конденсатора

3. Описание лабораторной установки

Переходные процессы исследуются в цепи, приведенной на рис. 5.4.

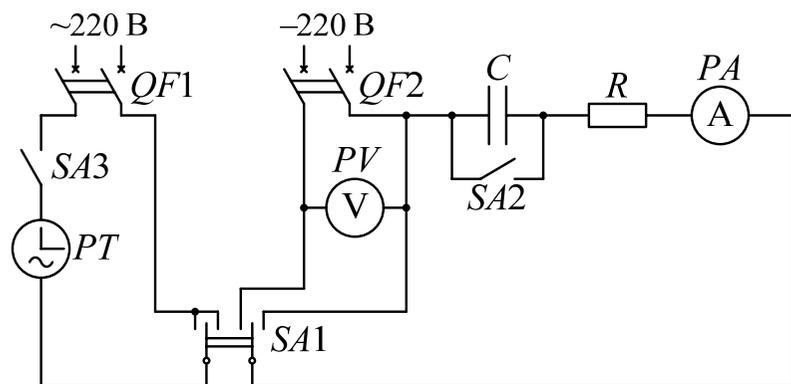


Рис. 5.4. Схема цепи R, C для исследования переходного процесса: PT – электрический секундомер; $SA1$ – переключатель с нейтральным (центральным) положением; PV – вольтметр (300 В); PA – миллиамперметр (100 мА)

Ряд элементов электрической цепи (амперметр, резистор R , конденсатор C , выключатель $SA2$, переключатель $SA1$) собраны на отдельной панели, на которой указаны значения сопротивления резистора и емкости.

При отсутствии электрического секундомера для отсчета времени можно воспользоваться секундной стрелкой часов.

4. Программа и методика выполнения работы

1. Собрать электрическую цепь по схеме, представленной на рис. 5.4. Переключатель $SA1$ поставить в нейтральное (центральное) положение.

2. Разрядить конденсатор C и тем самым подготовить его к эксперименту. Для этого замкнуть контакт $SA2$ и через 2...3 с его разомкнуть.

3. Записать значения емкости C , сопротивления R и напряжения U источника постоянной ЭДС.

4. Вычислить максимальное значение тока i_{\max} в момент включения незаряженного конденсатора ($t = 0$) и внести эти значения в табл. 5.2.

5. Включить переключатель $SA1$ на зарядку конденсатора и зафиксировать время достижения шести-семи последовательных значений тока через интервалы, равные 0,2 мА, начиная с максимального значения и кончая значением 0,05 мА.

Чтобы записать время достижения определенного значения тока, процесс зарядки и работу секундомера можно прервать, установив переключатель $SA1$ в нейтральное положение. Затем зарядку конденсатора и работу секундомера необходимо без промедления возобновить включением переключателя $SA1$ на зарядку конденсатора.

Данные измерений занести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

Зависимость тока и напряжения от времени при зарядке конденсатора

i , мА						
t , с						
u_C , В						

6. Полностью зарядить конденсатор. Длительность зарядки должна быть не менее 5 минут. Установить стрелку секундомера PT на нулевую отметку с помощью наружного рычага. Вычислить и вписать в табл. 5.3 значение тока i_{\max} при $t = 0$. Включить переключатель $SA1$ на разряд и фиксировать время достижения шести-семи последовательных значений тока через интервалы, равные 0,2 мА, последнее значение тока должно быть равно 0,05 мА. Записывать значения тока в табл. 5.3 необходимо со знаком минус в соответствии с отклонением стрелки амперметра.

Таблица 5.3

Зависимость тока и напряжения от времени при разрядке конденсатора

i , мА						
t , с						
u_C , В						

7. По данным измерений тока при зарядке конденсатора вычислить соответствующие значения напряжения на конденсаторе $u_C = U - Ri$ и внести их в табл. 5.2.

8. Построить графики $i = f(t)$ и $u_C = f(t)$ при зарядке конденсатора.
9. По данным измерений тока при разрядке конденсатора вычислить соответствующие значения напряжения на конденсаторе $u_C = -Ri$ и внести их в табл. 5.3.
10. Построить графики $i = f(t)$ и $u_C = f(t)$ при разрядке конденсатора.
11. Определить постоянную времени τ расчетным и графическим способами.

5. Контрольные вопросы

1. Что называют переходным процессом?
2. Что понимают под коммутацией?
3. Какое положение переключателя $SA1$ на рис. 5.4 соответствует зарядке конденсатора, а какое – разрядке конденсатора?
4. Что понимается под зарядкой конденсатора, а что под разрядкой конденсатора?
5. Как формулируется второй закон коммутации?
6. Что называют постоянной времени цепи R, C , как можно её рассчитать и определить графически?
7. Как определить примерную продолжительность полной зарядки конденсатора?
8. Как рассчитать токи, проходящие через конденсатор в первый момент при зарядке и при разрядке конденсатора?
9. От каких параметров цепи зависит время зарядки и разрядки конденсатора?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

1. Цель работы

Исследование переходных процессов в цепях, содержащих R, L и R, C при включении их на постоянное напряжение и при коротком замыкании.

2. Общие сведения

Переходным называется процесс, возникающий в электрической цепи при переходе от одного установившегося режима к другому.

Переходный процесс вызывается коммутацией, то есть включением или отключением источников или приемников электрической энергии, коротким замыканием отдельных участков цепи, переключениями.

Переходный процесс заканчивается спустя некоторое (теоретически бесконечно большое) время после коммутации.

Согласно первому закону коммутации ток в индуктивной катушке в момент коммутации имеет такое значение, которое он имел непосредственно перед коммутацией, затем он будет изменяться, начиная именно с этого значения.

$$i_L(0) = i_L(0_-) = i_L(0_+).$$

Поскольку перед включением цепи R, L ток отсутствовал, то при включении цепи R, L ток начнет изменяться с нуля и затем будет возрастать. При коротком замыкании цепи R, L ток начнет свое изменение с того значения, которое он имел перед коротким замыканием.

Согласно второму закону коммутации напряжение на конденсаторе в момент коммутации имеет такое значение, которое оно имело непосредственно перед коммутацией, затем оно будет изменяться, начиная именно с этого значения.

$$u_C(0) = u_C(0_-) = u_C(0_+).$$

Поскольку перед включением цепи R, C напряжение на конденсаторе отсутствовало, то при включении цепи R, C напряжение на конденсаторе u_C начнет свое изменение с нуля и затем будет возрастать. При коротком замыкании цепи R, C напряжение на конденсаторе u_C начнет свое изменение с того значения, которое оно имело перед коротким замыканием.

Полный характер изменения переходных токов и напряжений в цепях R, L и R, C определяется решением дифференциальных уравнений этих цепей.

При включении цепи R, L на постоянное напряжение переходный процесс описывается уравнением

$$Ri + L \frac{di}{dt} = U.$$

Решая уравнение, получим:

$$i = \frac{U}{R} (1 - e^{-\frac{t}{\tau}});$$

$$u_L = L \frac{di}{dt} = U e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $\tau = \frac{L}{R}$ – постоянная времени, определяющая скорость протекания переходного процесса в цепи R, L .

Из уравнений видно, что при включении цепи R, L ток постепенно возрастает от нуля до установившегося значения, равного $\frac{U}{R}$, а напряжение на индуктивном элементе постепенно убывает от своего начального значения U до нуля.

При коротком замыкании цепи R, L ток определяется из уравнения

$$Ri + L \frac{di}{dt} = 0.$$

Если до коммутации в цепи протекал ток, равный $\frac{U}{R}$, то в переходном режиме

$$i = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad \tau = \frac{L}{R}.$$

Напряжение на индуктивном элементе:

$$u_L = L \frac{di}{dt} = -U e^{-\frac{t}{\tau}}.$$

Из последних выражений следует, что при коротком замыкании цепи R, L ток и напряжение по абсолютному значению убывают от своих начальных значений до нуля.

При включении цепи R, C на постоянное напряжение возникает переходный процесс, описываемый уравнением

$$Ri + u_c = U.$$

$$i = C \frac{du_c}{dt}, \text{ поэтому } RC \frac{du_c}{dt} + u_c = U.$$

Решив уравнение, получим:

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

$$i = C \frac{du_c}{dt} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}},$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени, определяющая скорость протекания переходного процесса в цепи R, C .

Из выражений следует, что напряжение на конденсаторе постепенно возрастает от нуля до U , а ток постепенно убывает от $\frac{U}{R}$ до нуля.

При коротком замыкании цепи R, C происходит разряд конденсатора на сопротивление R . Напряжение на конденсаторе определится в этом случае уравнением

$$iR + u_c = 0.$$

Если до коммутации напряжение на конденсаторе равнялось U , то в переходном режиме

$$u_c = U e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad i = -\frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}; \quad \tau = RC.$$

Из последних выражений следует, что при коротком замыкании цепи R, C ток и напряжение на конденсаторе по абсолютному значению постепенно убывают от своих начальных значений до нуля.

Анализ выражений тока и напряжения как для цепи R, L , так и для цепи R, C , показывает, что переходный процесс практически заканчивается через $4 \dots 5 \tau$, поэтому по постоянной времени τ можно судить о длительности переходного процесса.

3. Описание лабораторной установки

Схема электрической цепи для исследования переходных процессов представлена на рис. 6.1. Переходный процесс практически продолжается сотые доли секунды.

Чтобы наблюдать переходный процесс, необходимо его повторять. Для этой цели используется поляризованное реле K , которое контактом $K1$ периодически, 50 раз в секунду, включает и отключает цепь от источника ЭДС.

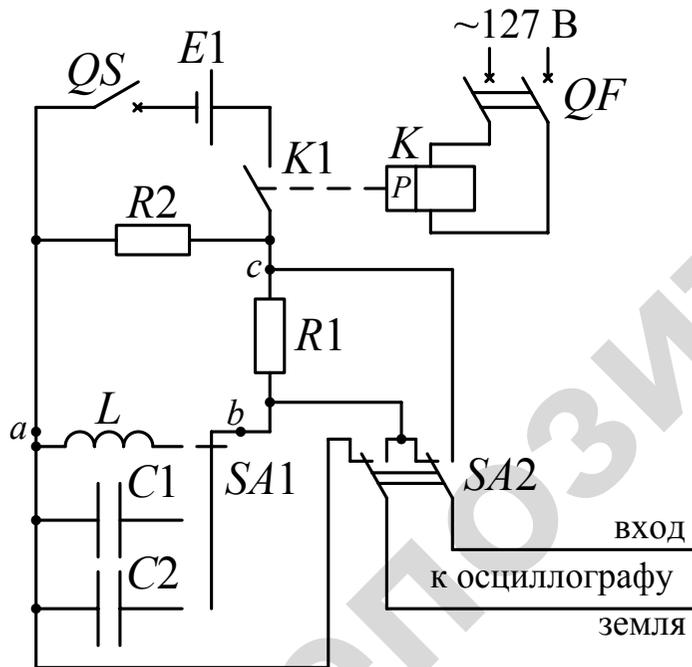


Рис. 6.1. Схема электрической цепи для исследования переходных процессов

Цепь имеет две параллельные ветви: ветвь с сопротивлением $R2$ и ветвь с последовательным соединением сопротивления $R1$ и одного из элементов, подключаемого к зажимам «а» и «b». При включении цепи процессы в каждой ветви не влияют друг на друга, и на осциллографе демонстрируются кривые переходного процесса во второй ветви (включение цепи $R1, L$ или цепи $R1, C$ на постоянное напряжение). При отключении цепи контактом $K1$ первая ветвь образует со второй ветвью замкнутую цепь с последовательным соединением сопротивления $R_{12} = R1 + R2$ и одного из элементов, подключаемого к зажимам «а» и «b». В данной цепи будут протекать переходные процессы, соответствующие режиму короткого замыкания цепи R_{12}, L или R_{12}, C . Этот переходный процесс будет демонстрироваться на осциллографе вслед за предыдущим. Например, для случая, когда к зажимам «а» и «b» подключен элемент L кривые тока и напряжения двух процессов на экране осциллографа имеют вид, приведенный на рис. 6.2.

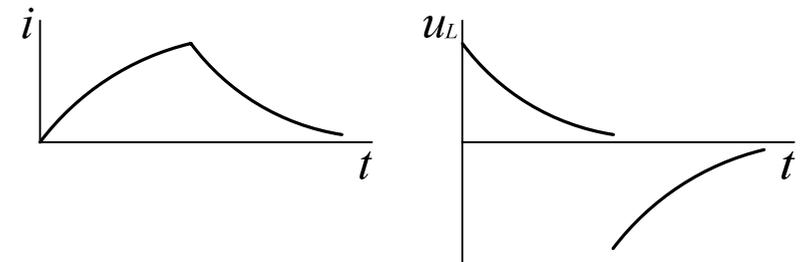


Рис. 6.2. Осциллограммы тока и напряжения при переходных процессах в цепи R, L

Эти кривые должны рисоваться отдельно, поскольку они соответствуют различным режимам различных цепей (рис. 6.3, 6.4).

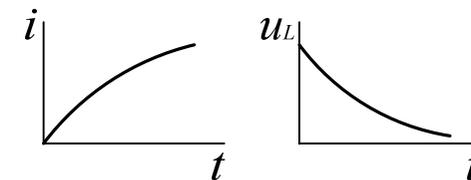


Рис. 6.3. Включение цепи R, L

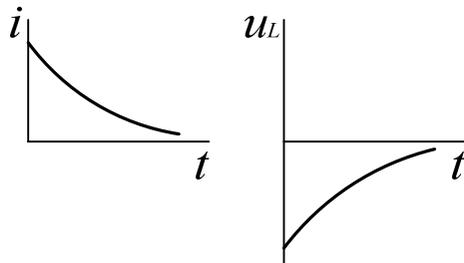


Рис. 6.4. Короткое замыкание цепи R, L

Принадлежность кривой к виду переходного процесса (включение или короткое замыкание цепи) определяется на основании законов коммутации. При расстановке осей координат для каждой кривой необходимо руководствоваться следующим. При включении цепи R, L ток i начинает изменяться с нуля и затем возрастает. Поэтому начало кривой $i(t)$ определяет начало осей координат (рис. 6.3).

Аналогично и при включении цепи R, C напряжение на емкости u_C начинает изменяться с нуля, затем возрастает. Поэтому начало кривой $u_C(t)$ определяет начало осей координат.

При коротком замыкании цепей R, L и R, C как токи, так и напряжения по абсолютной величине уменьшаются до значений, близких к нулю, и кривые $i(t)$ и $u(t)$ в конце приближаются к оси времени t (оси абсцисс) (рис. 6.4).

В любом случае как при включении цепей R, L и R, C , так и при коротком замыкании ось тока и ось напряжения (оси ординат) проходят через начала кривых $i(t)$ и $u(t)$ (рис. 6.3 и 6.4).

Поскольку напряжение на сопротивлении R_1 пропорционально току, то при подключении переключателем SA_2 осциллографа к зажимам «b» и «c» на экране будет кривая тока $i(t)$, а при подключении к зажимам «a» и «b» – кривая напряжения $u_L(t)$ или $u_C(t)$.

4. Программа и методика выполнения работы

1. Подключить к лабораторной установке ЭДС E_1 и напряжение $U = 127$ В, а также осциллограф (клеммы «вход» и «земля»).

2. Подключить осциллограф к источнику переменного напряжения 220 В. Установить ось времени на середину экрана, для чего отключить провод от клеммы «Вход» осциллографа и ручкой «Ось У» совместить линию, подчеркиваемую лучом (ось времени), с середи-

ной экрана. После этого вновь подключить провод к клемме «вход».

3. Для получения четкого, неподвижного изображения кривой тока или напряжения на экране осциллографа необходимо регулировать частоту развертки и амплитуду синхронизации осциллографа. Для получения кривых в достаточно крупном масштабе необходимо использовать регуляторы осциллографа «Усиление по вертикали» и «Усиление по горизонтали». В случае необходимости регулятор «Ослабление» при наблюдении кривых напряжения можно поставить в положение 1:100, при наблюдении тока – 1:10.

4. Поочередно подключая к зажимам «a» и «b» элементы L, C_1, C_2 , зарисовать в достаточно крупном масштабе кривые изменения напряжения и тока при включении цепи и при коротком замыкании цепи (всего 12 кривых).

5. Под каждой кривой записать её математическое выражение.

5. Контрольные вопросы

1. Что называется переходным процессом?
2. Какие элементы электрических цепей обуславливают наличие переходных процессов?
3. Что понимают под коммутацией?
4. Как формулируются первый и второй законы коммутации?
5. Что называют независимыми начальными условиями и как их определяют?
6. Что называют зависимыми начальными условиями и как их определяют?
7. Чему равен установившийся ток через конденсатор $i_{cу}$ и установившееся напряжение на индуктивном элементе $u_{Lу}$ при постоянном напряжении источника питания?
8. Как записывают в общем виде токи и напряжения свободного режима $i_{св}$ и $u_{св}$?
9. Как составляется характеристическое уравнение по однородному дифференциальному уравнению?
10. Как находится постоянная интегрирования A ?
11. Что означает постоянная времени τ , чему она равна для цепей R, L и R, C ?
12. Какова практическая длительность переходного процесса в цепях R, L и R, C ?

Лабораторная работа № 7

РАЗРЯД КОНДЕНСАТОРА НА КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ И РЕЗИСТОР

1. Цель работы

Исследовать переходный процесс при разряде конденсатора на цепь R, L .

2. Общие сведения

Разряд конденсатора с емкостью C на цепь R, L может быть двух видов: аperiodический и периодический.

а) Аperiodический разряд конденсатора характеризуется монотонным уменьшением напряжения на конденсаторе с начального значения до нуля.

Зависимость напряжения на конденсаторе u_C от времени t , полученная в результате решения дифференциального уравнения цепи R, L, C , имеет вид:

$$u_C = \frac{U_0}{p_2 - p_1} (p_2 e^{p_1 t} - p_1 e^{p_2 t}),$$

где U_0 – напряжение на конденсаторе до разряда;

p_1, p_2 – (корни характеристического уравнения) определяются по формуле

$$p_{1,2} = -\frac{R}{2L} \pm \sqrt{\frac{R^2}{4L^2} - \frac{1}{LC}}.$$

Разряд конденсатора будет аperiodическим, если сопротивление в цепи относительно велико:

$$R > 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Корни p_1 и p_2 будут вещественными. При $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ процесс будет также аperiodическим. $R = 2\sqrt{\frac{L}{C}}$ называется критическим сопротивлением $R_{кр}$.

б) Периодический (колебательный) разряд конденсатора характеризуется изменением напряжения на конденсаторе по затухающей синусоиде:

$$u_{C\text{св}} = \frac{U_0 \omega_0}{\omega_{\text{св}}} e^{-\delta t} \sin(\omega_{\text{св}} t + \theta),$$

где $\delta = \frac{R}{2L}$ – коэффициент затухания колебаний;

$\omega_{\text{св}} = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{R^2}{4L^2}}$ – угловая частота затухающих колебаний;

$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ – резонансная частота или угловая частота незатухающих колебаний.

Разряд конденсатора будет периодическим, если сопротивление в цепи относительно мало:

$$R < 2\sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Корни p_1 и p_2 будут комплексными.

Быстроту затухания колебаний принято характеризовать декрементом колебаний $\Delta = e^{\delta T_{\text{св}}} = \frac{A_{m1}}{A_{m2}}$, равным отношению предыдущей амплитуды A_{m1} к последующей A_{m2} одного знака, а также логарифму

рифмическим декрементом колебаний $\ln \Delta = \delta T_{\text{св}}$, где $T_{\text{св}}$ – период затухающих колебаний.

3. Описание лабораторной установки

Исследование разряда конденсатора на резистор и индуктивную катушку проводится с помощью установки, собранной на отдельной панели. Схема электрической цепи этой установки показана на рис. 7.1.

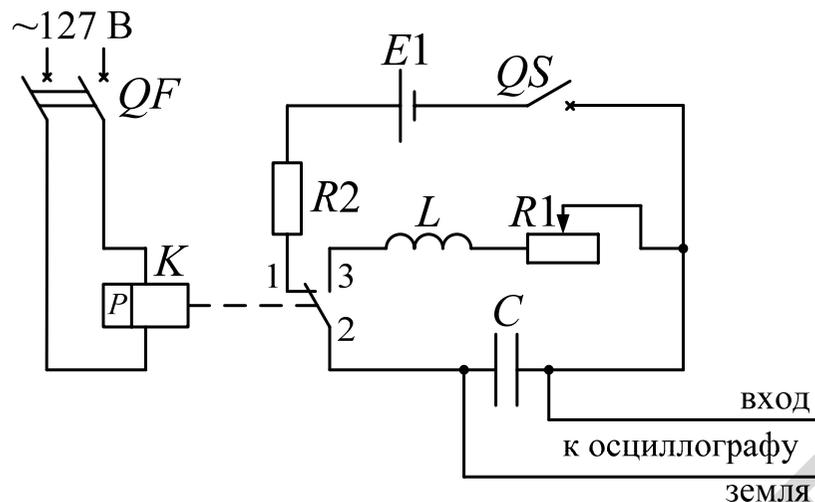


Рис. 7.1. Схема электрической цепи для исследования аperiodического и периодического разрядов конденсатора

Электромагнитное реле K периодически замыкает контакты 1-2 и 2-3. При замыкании контактов 1-2 конденсатор C заряжается от источника постоянной ЭДС $E1$, а при замыкании контактов 2-3 конденсатор C разряжается на сопротивление $R1$ и индуктивность L . Напряжение с конденсатора подается на вход осциллографа. На экране осциллографа можно наблюдать как кривую изменения напряжения u_C при зарядке конденсатора (кривая между точками 1-0, рис. 7.2), так и кривую изменения напряжения u_C при разряде (кривая между точками 0-2, рис. 7.2).

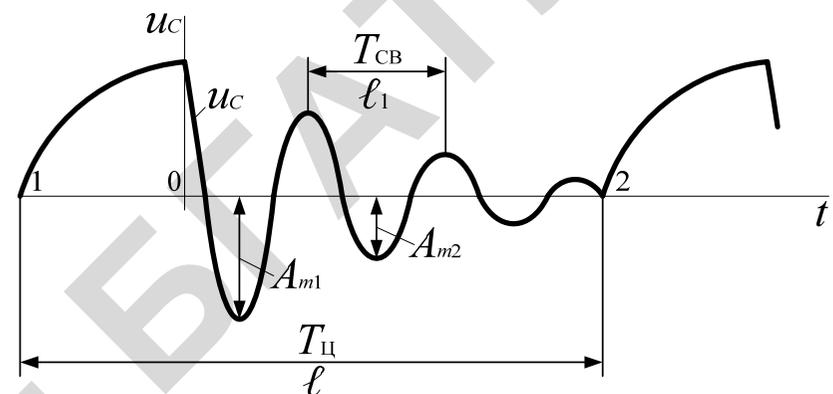


Рис. 7.2. Кривые изменения напряжения на конденсаторе при его зарядке и разряде

В зависимости от величины переменного сопротивления $R1$ разряд может быть периодическим и аperiodическим.

На панели стенда указаны емкость C , индуктивность L , сопротивление индуктивной катушки R_k и время $T_{\text{ц}}$, приходящееся на один цикл зарядки и разряда конденсатора, определяемое продолжительностью переключения контактов реле K .

4. Программа и методика выполнения работы

1. Подключить к лабораторной установке осциллограф и источник питания.
2. Регулируя частоту развертки и усиления по вертикали осциллографа, получить на экране четкое, неподвижное изображение кривой напряжения на конденсаторе при его зарядке и разряде.
3. Подобрать сопротивление переменного резистора $R1$ такой величины, чтобы на экране осциллографа наблюдался периодический разряд конденсатора. Записать в табл. 7.1 значения этого сопротивления, а также сопротивления катушки R_k , ее индуктивности L , емкости конденсатора C и продолжительности цикла зарядка – разряд $T_{\text{ц}}$.

Таблица 7.1

Параметры цепи при периодическом разряде конденсатора

L , Гн	C , Ф	R_1 , Ом	R_k , Ом	$T_{ц}$, с

4. Подсчитать размер кривой цикла зарядка – разряд l в делениях экрана осциллографа и записать в табл. 7.2. Измерить расстояние l_1 между двумя соседними максимумами напряжения u_C при разряде конденсатора.

6. Измерить значения двух соседних отрицательных амплитуд напряжения конденсатора u_C при разряде A_{m1} и A_{m2} (рис. 7.2).

7. Перерисовать кривую напряжения u_C с экрана осциллографа.

8. Меняя сопротивление R_1 , определить и записать критическое сопротивление $R_{кр}$, при котором периодический разряд переходит в аperiodический ($R_{кр} = R_1 + R_2$, где R_k – активное сопротивление индуктивной катушки).

9. Установить величину сопротивления R_1 больше критической и зарисовать кривую напряжения на конденсаторе u_C при аperiodическом разряде.

10. Результаты замеров внести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Характеристики осциллограмм периодического и аperiodического разрядов конденсатора

Эксперимент							Расчет					
l , дел	l_1 , дел	A_{m1} , дел	A_{m2} , дел	$R_{кр}$, Ом	m_t , с/дел	$T_{св}$, с	Δ	$\omega_{св}$, рад/с	$T_{св}$, с	δ , с ⁻¹	Δ	$R_{кр}$, Ом

5. Обработка опытных данных

1. Подсчитать угловую частоту затухающих колебаний $\omega_{св}$ контура R, L, C при периодическом разряде конденсатора, учитывая то, что $R = R_1 + R_k$. Их значения необходимо определить по табл. 7.1.

2. Определить масштаб времени кривой $u_C(t)$, исходя из продолжительности цикла зарядка – разряд $T_{ц}$:

$$m_t = \frac{T_{ц}}{l} \text{ (с/дел)}.$$

3. Определить период затухающих колебаний $T_{св}$ по экспериментальным данным:

$$T_{св} = m_t l_1.$$

Определить $T_{св}$ расчетным путем:

$$T_{св} = \frac{2\pi}{\omega_{св}}.$$

4. Определить декремент колебаний Δ по экспериментальным данным:

$$\Delta = \frac{A_{m1}}{A_{m2}}.$$

5. Определить декремент колебаний расчетным путем:

$$\Delta = e^{\delta T_{св}},$$

где δ – коэффициент затухания, $\delta = \frac{R}{2L}$.

6. Определить расчетным путем значение критического сопротивления для заданных L и C и сравнить его с $R_{кр}$, определенным экспериментально.

7. Расчеты привести в отчете, результаты внести в табл. 7.2.

6. Контрольные вопросы

1. Что такое аperiodический и периодический разряды конденсатора?

2. При каких условиях наступают аperiodический и периодический разряды?

3. Что понимают под критическим сопротивлением $R_{кр}$ и чему оно равно?

4. Почему колебания напряжения u_C затухают при периодическом разряде конденсатора?

5. При каких условиях возможны незатухающие колебания?

6. Какими величинами характеризуют быстроту затухания колебаний?

7. Где находит применение колебательный процесс цепи R, L, C ?

8. Чему равна угловая частота затухающих и незатухающих колебаний контура R, L, C ?

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ НА АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА

1. Цель работы

Исследование поверхностного эффекта в стальном проводе круглого сечения.

2. Общие сведения

Обычно при расчетах электрических цепей активное сопротивление элементов цепи считают постоянным, не зависящим от частоты. Это справедливо тогда, когда поверхностный эффект сказывается незначительно.

Постоянный ток распределяется по сечению однородного проводника равномерно (если поперечные размеры проводника малы по сравнению с его длиной). Плотность тока J во всех точках сечения в этом случае одинаковая:

$$J = \frac{I}{S},$$

где I – ток;

S – сечение проводника.

Сопротивление проводника постоянному току называют омическим. Иначе обстоит дело при переменном токе.

Переменный электрический ток распределяется неравномерно по сечению проводов. Наибольшее значение плотности тока будет на поверхности провода, по мере удаления в глубь провода плотность тока убывает. Это явление называется поверхностным эффектом.

Переменная электромагнитная волна, проникая в глубь провода из пространства, окружающего провод, по мере проникновения затухает. Соответственно и амплитуды напряженности электрического поля, следовательно, и амплитуды плотности тока убывают. Наибольшее значение плотности тока будет на поверхности провода, а наименьшее – в центре провода.

Поверхностный эффект объясняется тем, что нагревание провода током есть поглощение энергии электромагнитного поля, поступающего в провод через его поверхность из окружающего пространства, поэтому электромагнитная волна затухает по мере проникновения в глубь проводящей среды. Соответственно амплитуды плотности тока, напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля имеют наибольшее значение у поверхности провода. В идеальный проводник ($\gamma = \infty$) электромагнитная волна совсем не проникает, она полностью отражается от него, и ток проводника становится поверхностным. Степень затухания электромагнитной волны зависит от частоты f , удельной проводимости γ , относительной магнитной проницаемости μ_r и диаметра провода. Чем больше эти величины, тем ярче выражен поверхностный эффект.

Вытеснение тока из внутренних слоев эквивалентно некоторому уменьшению сечения провода. По этой причине сопротивление провода переменному току (активное сопротивление) выше, чем постоянному.

При высоких частотах переменного тока внутренняя часть провода практически не используется, поэтому часто применяются пустотелые провода в форме труб. При промышленной частоте $f = 50$ Гц поверхностный эффект незначительный и им можно пренебречь.

3. Описание лабораторной установки

В данной работе взят стальной провод, в котором поверхностный эффект заметен уже при сравнительно низких частотах. Для

измерения активного R и индуктивного X сопротивлений стального провода используется метод трех вольтметров. Напряжение от генератора ГЗ-33 подается на последовательно соединенные эталонное сопротивление $R_n = 2,5$ Ом и исследуемый стальной провод R_x (рис. 8.1).

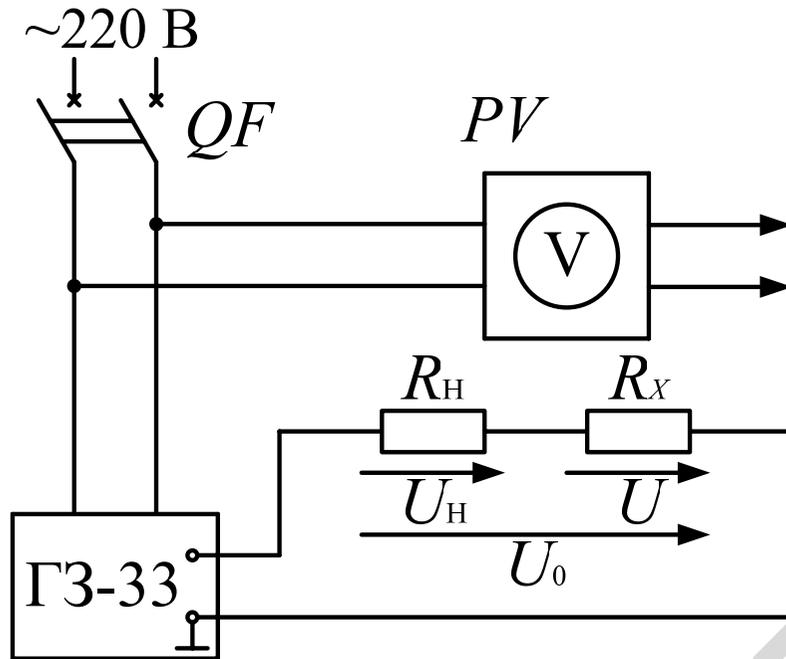


Рис. 8.1. Схема электрической цепи для исследования влияния частоты на сопротивление провода:
ГЗ-33 – звуковой генератор; PV – электронный вольтметр

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать цепь по схеме, представленной на рис. 8.1. Установить на эталонном сопротивлении напряжение $U_n = 0,5$ В и в дальнейшем поддерживать его неизменным.

4.2. Измерить напряжения U_n , U и U_0 при разных частотах. Данные измерений занести в табл. 8.1.

Зависимость сопротивления провода от частоты

Частота	f , Гц	500	2000	3000	5000	20000
Измерено	U_n , В					
	U , В					
	U_0 , В					
Вычислено	R , Ом					
	X , Ом					

4.3. Построить кривые $R = F_1(f)$; $X = F_2(f)$.

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

Определение активного и индуктивного сопротивлений провода производится с помощью векторных диаграмм на основании показаний трех вольтметров.

Так как $\dot{U}_0 = \dot{U}_n + \dot{U}$, то векторы \dot{U}_0 , \dot{U}_n и \dot{U} должны образовывать замкнутый треугольник. Сначала в масштабе (рекомендуется $m_U = 0,1$ В/см) откладывается вектор напряжения на эталонном сопротивлении \dot{U}_n (рис. 8.2). Вектор тока \dot{I} совпадает с вектором \dot{U}_n , так как R_n – активное сопротивление. Затем от начала вектора \dot{U}_n проводят дугу окружности радиусом, равным напряжению U_0 в масштабе напряжения. Аналогично с конца вектора \dot{U}_n проводят дугу радиусом, равным напряжению U . Пересечение дуг определит положение векторов \dot{U}_0 и \dot{U} (рис. 8.2).

Треугольник ABC в масштабе сопротивлений m_Z является треугольником сопротивлений: $AC \cdot m_Z = R_0$ – общее активное сопротивление цепи; $BC \cdot m_Z = X$ – реактивное сопротивление стального провода; $AB \cdot m_Z = Z$ – полное сопротивление цепи. Масштаб сопротивлений определяется длиной вектора \dot{U}_n , соответствующего сопротивлению $R_n = 2,5$ Ом, а именно: $m_Z = \frac{2,5}{AD}$ Ом/мм.

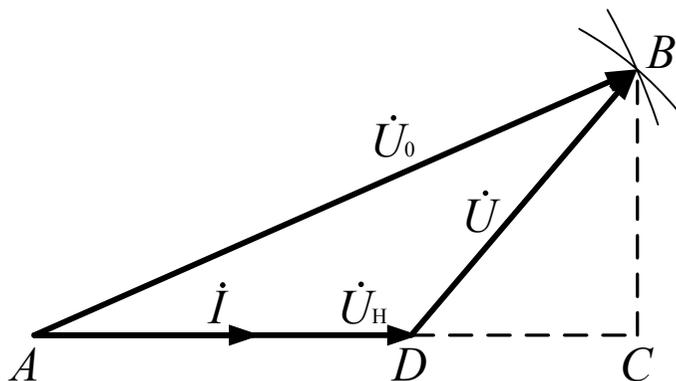


Рис. 8.2. Графическое определение активного и реактивного сопротивлений

Активное сопротивление стального провода определится длиной отрезка DC :

$$R = DC \cdot m_z.$$

Индуктивное сопротивление стального провода определится длиной отрезка BC :

$$X = BC \cdot m_z.$$

6. Контрольные вопросы

1. Чем объясняется отличие активного сопротивления от омического?
2. Почему активное сопротивление возрастает с ростом частоты тока?
3. Почему влияние частоты на активное сопротивление в стальном проводе сказывается больше, чем в медном?
4. Как распределяется плотность тока по сечению проводника?
5. В каком технологическом процессе используется поверхностный эффект?
6. От каких величин зависит степень затухания электромагнитной волны?
7. При каких условиях поверхностный эффект можно не учитывать и почему?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Гардарики, 2007. – 704 с.
2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электромагнитное поле : учебник / Л. А. Бессонов. – Москва : Гардарики, 2003. – 320 с.
3. Теоретические основы электротехники : в 3 т. / К. С. Демирчян [и др.]. – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 3 т.
Т. 1. – 463 с. – Содерж. : Основные понятия и законы теории электромагнитного поля и теории электрических и магнитных цепей. Теория линейных электрических цепей.
Т. 2. – 576 с. – Содерж. : Теория линейных электрических цепей. Теория нелинейных электрических и магнитных цепей.
Т. 3. – 377 с. – Содерж. : Теория электромагнитного поля.
4. Сборник задач по теоретическим основам электротехники : учебное пособие / Л. А. Бессонов [и др.]; под ред. Л. А. Бессонова. – Москва : Высшая школа, 2003. – 528 с.

Дополнительная

5. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс для студентов вузов. В 3 ч. Ч. 1 / сост.: А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – Минск : БГАТУ, 2008. – 353 с.
6. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс для студентов вузов. В 3 ч. Ч. 3 / сост.: А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – Минск : БГАТУ, 2010. – 321 с.
7. Теоретические основы электротехники : курс лекций. В 2 ч. Ч. 1. Линейные электрические цепи / сост.: В. С. Корко [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2002. – 170 с.

8. ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 01.01.1975. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 32 с.

9. ГОСТ 1494-77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. – Взамен ГОСТ 1994-61; введ. 01.07.1978. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 36 с.

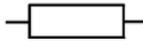
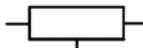
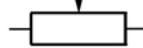
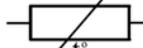
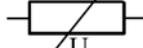
10. ГОСТ 2.710-81. ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – Взамен ГОСТ 2.710-75; введ. 01.07.1981. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 15 с.

11. ГОСТ 2.723-68. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушка индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители. – Введ. 01.01.1971. – Москва : Издательство стандартов, 1973. – 15 с.

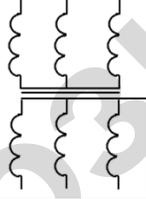
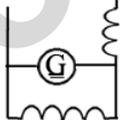
12. ГОСТ 2.728-74. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. – Взамен ГОСТ 2.728-68, ГОСТ 2.729-68 в части п. 12, ГОСТ 2.747-68 в части подп. 24, 25 таблицы [переизд. май 2002 г. с изменен. № 1, 2, утв. в августе 1980 г., июле 1991 г.]; введ. 01.07.1975. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.

13. ГОСТ 2.755-87. ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. – Взамен ГОСТ 2.738-68; ГОСТ 2.755-74; введ. 01.01.1988. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 21 с.

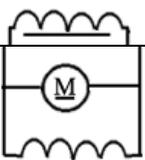
ГРАФИЧЕСКИЕ И БУКВЕННЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

Наименование	Графическое обозначение	Буквенное обозначение
1	2	3
Постоянный ток	—	I
Полярность постоянного тока положительная	+	
Полярность постоянного тока отрицательная	—	
Переменный ток	~	
Переменный ток частотой 50 Гц	~50 Гц	
Трехфазный ток частотой 50 Гц, напряжением 220 В	3~50 Гц, 220 В	
Трехфазный ток, четырехпроводная линия (три провода, нейтраль) частотой 50 Гц, напряжением 220/380 В	3N~50 Гц, 220/380 В	
Резистор постоянный		R
Резистор постоянный с дополнительными отводами		R
Шунт измерительный		R
Резистор переменный		R
Терморезистор		RK
Варистор		RU

Продолжение приложения 1

1	2	3
Потенциометр		R
Конденсатор постоянной ёмкости		C
Конденсатор постоянной ёмкости электролитический		C
Конденсатор переменной ёмкости		C
Вариконд		C
Катушка индуктивности*		L
Дроссель с ферромагнитным магнитопроводом*		L
Трансформатор однофазный двухобмоточный с ферромагнитным сердечником*		TV
Автотрансформатор с ферромагнитным сердечником*		TV
Измерительный трансформатор тока*		TA
Трансформатор трехфазный с ферромагнитным магнитопроводом двухобмоточный с соединением обмоток звезда – звезда с выведенной нейтральной точкой*		TV
Генератор постоянного тока со смешанным возбуждением		G

Продолжение приложения 1

1	2	3
Синхронный генератор трехфазный с обмотками, соединенными в звезду с невыведенной нейтралью		G
Двигатель постоянного тока с параллельным возбуждением		M
Асинхронный двигатель трехфазный, соединенный в треугольник, с короткозамкнутым ротором		M
Амперметр		PA
Вольтметр		PV
Ваттметр		PW
Счетчик активной энергии		PI
Частотомер		PF
Фазометр		
Омметр		PR
Гальванометр		

Окончание приложения 1

1	2	3
Контакт замыкающий коммутационного устройства		QS
Контакт размыкающий коммутационного устройства		QS
Контакт переключающий с нейтральным центральным положением		SA
Разъединитель трехполюсный		QS
Контакт выключателя замыкающий трехполюсный с автоматическим срабатыванием максимального тока		QF
Переключатель однополюсный шести-позиционный		SA
Предохранитель плавкий		FU

* Количество полуокружностей в изображении обмотки и направление выводов не устанавливается.

Учебное издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

В трех частях

Часть 3

Трехфазные цепи. Переходные процессы
в электрических цепях. Переменное электромагнитное поле

Составители:

Крутов Анатолий Викторович,
Гузанова Татьяна Федоровна,
Бойко Михаил Анатольевич,
Нефедов Святослав Святославович

Ответственный за выпуск *В. А. Ковалев*
Редактор *Н. А. Антипович*
Компьютерная верстка *Н. А. Антипович*

Подписано в печать 28.10.2015 г. Формат 60×84^{1/16}.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 4,18. Уч.-изд. л. 3,27. Тираж 80 экз. Заказ 764.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Учреждение образования
«Белорусский государственный аграрный технический университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий
№ 1/359 от 09.06.2014.
№ 2/151 от 11.06.2014.
Пр-т Независимости, 99–2, 220023, Минск.