

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
АГРАРНЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

**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)»*

В двух частях

Часть 2

Трёхфазные цепи переменного тока. Переходные процессы
в электрических цепях. Переменное электромагнитное поле

Минск
БГАТУ
2021

УДК 621.31(07)
ББК 31.2я7
Т33

Составители:

кандидат технических наук, доцент *А. В. Крутов*,
кандидат физико-математических наук, доцент *Н. Г. Крылова*,
старший преподаватель *Т. Ф. Гузанова*,
старший преподаватель *М. А. Бойко*,
старший преподаватель *В. В. Мацкело*

Рецензенты:

кафедра «Электротехника и электроника»
Белорусского национального технического университета
(кандидат технических наук, доцент,
заведующий кафедрой *Ю. В. Бладыко*);
кандидат технических наук, доцент, заместитель директора
Республиканского научно-производственного унитарного предприятия
«Институт энергетики НАН Беларуси» *Н. Е. Шевчик*

Теоретические основы электротехники. Лабораторный практикум :
Т33 учебно-методическое пособие. В 2 ч. Ч. 2. Трехфазные цепи переменного тока. Переходные процессы в электрических цепях. Переменное электромагнитное поле / сост.: А. В. Крутов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2021. – 92 с.
ISBN 978-985-25-0116-3.

Содержит материал для проведения лабораторных работ по разделам трехфазных цепей переменного тока, переходным процессам в линейных цепях, цепей с распределенными параметрами, теории переменного электромагнитного поля. Представлены методические указания по исследованию соответствующих электрических цепей, обработки получаемых результатов экспериментальных данных.

Для студентов учреждений высшего образования, обучающихся 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)».

УДК 621.31(07)
ББК 31.2я7

ISBN 978-985-25-0116-3 (ч. 2)
ISBN 978-985-25-0114-9

© БГАТУ, 2021

СОДЕРЖАНИЕ

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	4
ПРАВИЛА ТЕХНИКИ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	6
Модуль 4. ТРЕХФАЗНЫЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА	
Лабораторная работа № 1. Исследование трехфазной цепи при соединении потребителей звездой	8
Лабораторная работа № 2. Исследование трехфазной цепи при соединении потребителей треугольником	17
Лабораторная работа № 3. Исследование трехфазной цепи при неоднородных сопротивлениях фаз приемника	22
Лабораторная работа № 4. Симметричные составляющие трехфазной системы токов.....	28
Модуль 5. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	
Лабораторная работа № 5. Исследование заряда и разряда конденсатора	37
Лабораторная работа № 6. Исследование переходных процессов в линейных электрических цепях.....	44
Лабораторная работа № 7. Исследование разряда конденсатора на катушку индуктивности и резистор	51
Модуль 6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА. ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ. ПЕРЕМЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ	
Лабораторная работа № 8. Исследование индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником	57
Лабораторная работа № 9. Исследование феррорезонанса напряжений	66
Лабораторная работа № 10. Исследование феррорезонанса токов	71
Лабораторная работа № 11. Исследование однородной линии с распределенными параметрами в установившемся режиме	77
Лабораторная работа № 12. Исследование влияния частоты на активное сопротивление проводника.....	86
СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	90

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

Цель лабораторных занятий – более глубокое усвоение студентом теоретических вопросов путем экспериментальной проверки основных положений курса. Кроме того, эти занятия способствуют выработке навыков проведения исследования 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 этой работе. 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 безопасности и соблюдать дисциплину. Лица, нарушающие правила безопасности, отстраняются от выполнения работы.

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

При выполнении работы бригадой студенты должны распределить обязанности 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, провода убрать в ящик стола. После этого приступить к оформлению отчета.

Отчет по проведенной работе оформляется каждым студентом. Отчет должен содержать: название работы, ее цель; электрические схемы цепей, исследованных в данной работе; 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 инструментов и с соблюдением стандартных обозначений для элементов электрических схем.

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

Отчет по проведенной работе должен быть защищен студентом в конце занятия или перед началом следующей работы. Студент, не отчитавшийся за две работы, не допускается к выполнению следующей. Пропущенные лабораторные занятия по уважительным или неуважительным причинам должны быть отработаны 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 безопасности.

В лаборатории по курсу «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ) опасными являются фазные и линейные напряжения 127, 220, 380 В. Опасными могут быть напряжения выше 36 В, а также ЭДС самоиндукции при размыкании цепей с индуктивностями, неразрядившиеся конденсаторы. Кроме того, при неправильном обращении 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 возникающая электрическая дуга поражает органы зрения.

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности:

1. Не допускается загромождать рабочие места личными вещами. 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 к зажимам. Все неиспользованные проводники должны быть убраны в ящик стола.
4. Включение цепи под напряжение разрешается только после проверки преподавателем или лаборантом.
5. Во время работы с электроцепью нужно быть внимательным и осторожным, находиться на рабочем месте и не допускать к нему посторонних. Каждый включающий цепь под напряжение должен предупредить о своем действии 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 позвать преподавателя.

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

8. Все изменения в цепи проводятся при отключенном выключателе. После этого цепь должен проверить преподаватель или лаборант. Во время перерыва в работе 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 ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ЗВЕЗДОЙ

1. Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование трехфазной цепи при соединении приемника звездой и выявление роли нейтрального провода.

2. Общие сведения

Соединение приемников электрической энергии звездой (рис. 1.1) является распространенным видом соединения в трехфазных цепях.

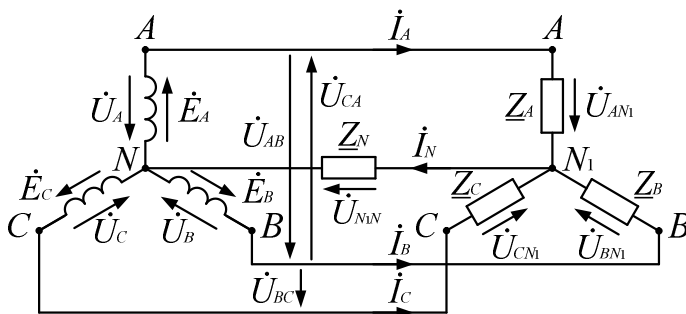


Рис. 1.1. Трехфазная электрическая цепь при соединении генератора и приемника звездой с нейтральным проводом

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: $I_{\text{л}} = I_{\text{ф}}$.

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} называют 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} называют 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).

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

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: $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$.

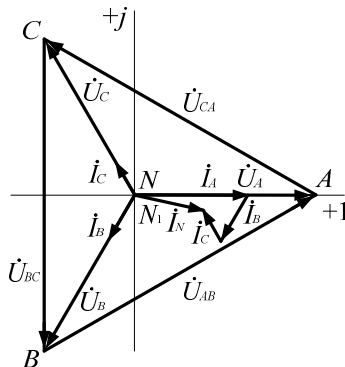


Рис. 1.2. Топографическая диаграмма напряжений и векторная диаграмма токов для схемы рис. 1.1 при несимметричном приемнике, сопротивления фаз активные, $Z_N = 0$

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 ($\mathcal{U}_{AN_1} = \mathcal{U}_A$, $\mathcal{U}_{BN_1} = \mathcal{U}_B$, $\mathcal{U}_{CN_1} = \mathcal{U}_C$), т. е. 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:

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

Ток в нейтральном проводе находят по первому закону Кирхгофа:

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

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

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

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

Напряжения на фазах приемника находят по второму закону Кирхгофа:

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

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

диаграммы напряжений видно, что при отсутствии нейтрального провода в трехфазной цепи с несимметричным приемником напряжения на фазах приемника оказываются разными по величине. Поскольку все потребители рассчитаны на определенное напряжение, то повышение напряжения и снижение напряжения, нарушают нормальную работу потребителя.

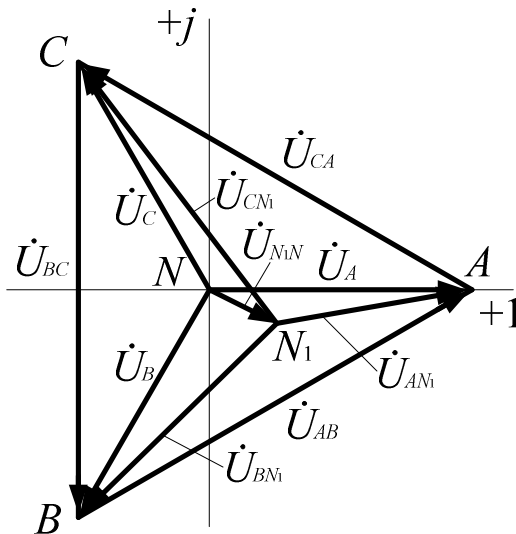


Рис. 1.3. Топографическая диаграмма напряжений для схемы рис. 1.1 при несимметричном приемнике без нейтрального провода, $\underline{Z}_N = \infty$

Основным назначением нейтрального провода с весьма малым сопротивлением \underline{Z}_N является сведение к нулю напряжения между нейтральными точками приемника и генератора: $\underline{U}_{N_1N} = \underline{I}_N \underline{Z}_N = \underline{I}_N \cdot 0 = 0$. В этом случае напряжения на фазах приемника будут равны напряжениям на фазах генератора. Между фазными и линейными напряжениями приемника сохраняется равенство $U_{л} = \sqrt{3}U_{ф}$.

Очевидно, что при симметричном приемнике, то есть при одинаковых сопротивлениях в фазах приемника, токи фаз будут равны по величине и сдвинуты по фазе на угол 120° и, следовательно, их сумма 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 $U_{N_1N} = 0$.

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 (рис. 1.4) содержит приемник, каждая фаза которого представляет собой набор резисторов. Сопротивление фаз приемника можно изменять.

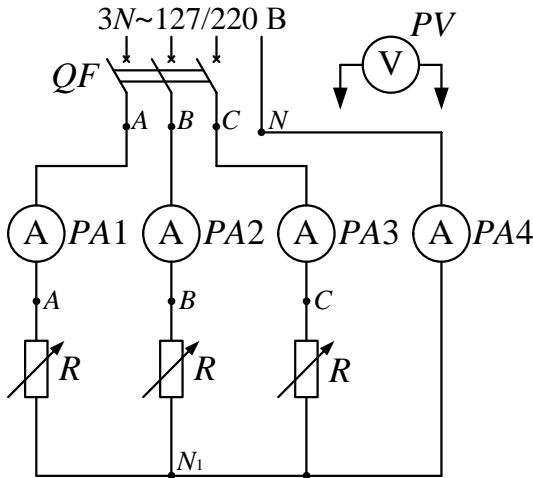


Рис. 1.4. Электрическая схема для исследования трехфазной цепи при соединении приемника звездой:

PA1, PA2, PA3 – амперметры, 1 А; PA4 – амперметр, 1 А, с зеркальной шкалой;
PV – вольтметр, 150–300 В

4. Программа и методика выполнения работы

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

Таблица 1.1

Значения линейных и фазных напряжений на входе цепи

Измерено, В						Вычислено		
U_{AB}	U_{BC}	U_{CA}	U_A	U_B	U_C	U_{AB}/U_A	U_{BC}/U_B	U_{CA}/U_C

4.2. Измерить токи и напряжения на приемнике, изменяя сопротивления фаз приемника в соответствии с табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения напряжений и токов приемника, соединенного звездой с нейтральным проводом

Приемник	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$U_{AN},$ В	$U_{BN},$ В	$U_{CN},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А	$I_N,$ А
Симметричный. <i>Включить все резисторы в фазах</i>										
Обрыв фазы приемника. <i>В одной фазе по указанию преподавателя отключить все резисторы</i>										
Несимметричный. <i>Включить разное число резисторов в фазах</i>										

4.3. Отключить нейтральный провод.

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

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.

Таблица 1.3

Значения напряжений и токов приемника,
соединенного звездой без нейтрального провода

Приемник	$U_{AB},$ 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	$U_{N_1N},$ В
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.

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 табл. 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 $m_U = 50 \text{ В/см}$. Концы векторов напряжений \mathcal{U}_A , \mathcal{U}_B , \mathcal{U}_C соответствуют потенциалам точек A , B , C схемы на 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 точки N_1 на топографической диаграмме в общем случае нужно искать методом засечек. Из вершины A проводится окружность радиусом U_{AN_1} , а из вершины B – радиусом U_{BN_1} , и из вершины C – радиусом U_{CN_1} . Точка пересечения окружностей есть точка N_1 . Ее соединяют с точками A , B , C диаграммы так, как показано на рис. 1.3, и получают векторы фазных напряжений приемника \mathcal{U}_{AN_1} , \mathcal{U}_{BN_1} , \mathcal{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 \mathcal{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 \mathcal{I}_A , \mathcal{I}_B , \mathcal{I}_C рисуются на всех диаграммах из точки N_1 , совпадающими по фазе с соответствующими фазными напряжениями приемника, так как сопротивления всех фаз чисто активные. Рекомендуемый масштаб для тока $m_i = 0,5 \text{ А/см}$.

Вектор тока в нейтральном проводе находится из соотношения $\mathbf{I}_N = \mathbf{I}_A + \mathbf{I}_B + \mathbf{I}_C$.

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

6. Контрольные вопросы

1. Когда трехфазный приемник соединяют звездой и как это соединение выполняется?
2. Что называется фазой приемника?
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 используется соединение приемника звездой без нейтрального провода и в каких случаях с нейтральным проводом?
7. В чем состоит назначение нейтрального провода?

Лабораторная работа № 2

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ ПРИ СОЕДИНЕНИИ ПОТРЕБИТЕЛЕЙ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

1. Цель работы

Целью работы является 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} , \dot{U}_{CA} , 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).

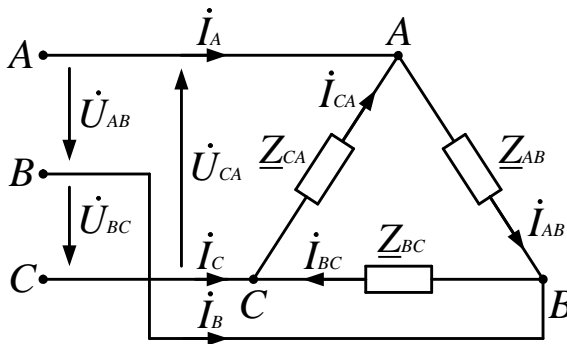


Рис. 2.1. Трехфазная электрическая цепь при соединении приемника треугольником

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

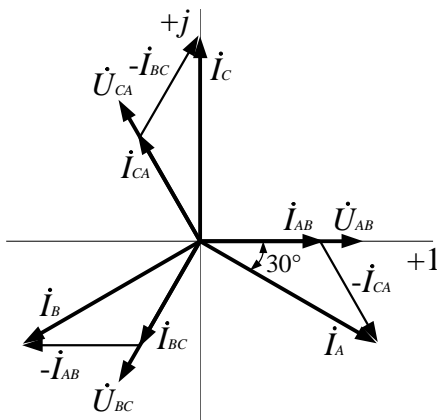


Рис. 2.2. Векторные диаграммы напряжений и токов при соединении треугольником, в случае симметричного приемника с активным сопротивлением фаз

Токи в фазах приемника находят по закону Ома:

$$\underline{I}_{AB} = \frac{\underline{U}_{AB}}{\underline{Z}_{AB}}; \quad \underline{I}_{BC} = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_{BC}}; \quad \underline{I}_{CA} = \frac{\underline{U}_{CA}}{\underline{Z}_{CA}}.$$

Линейные токи определяют через фазные токи по первому закону Кирхгофа:

$$\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA};$$

$$\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB};$$

$$\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}.$$

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

По векторной диаграмме можно доказать, что при симметричном приемнике $I_{л} = \sqrt{3}I_{ф}$. 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 (рис. 2.3) содержит приемник, каждая фаза которого представляет собой набор резисторов.

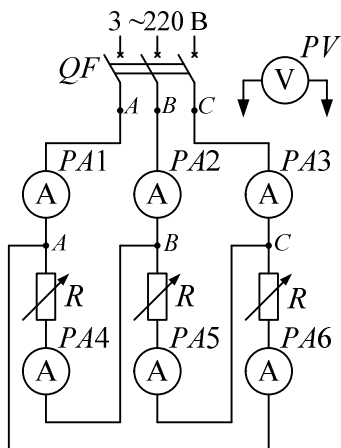


Рис. 2.3. Электрическая схема для исследования трехфазной цепи при соединении приемника треугольником:
 PA1, PA2, PA3 – амперметры, 2 А; PA4, PA5, PA6 – амперметры, 1 А;
 PV – вольтметр, 150–300 В

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.

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 табл. 2.1.

Таблица 2.1

Значения напряжений и токов при соединении приемника треугольником

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

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: $\underline{I}_A = \underline{I}_{AB} - \underline{I}_{CA}$; $\underline{I}_B = \underline{I}_{BC} - \underline{I}_{AB}$; $\underline{I}_C = \underline{I}_{CA} - \underline{I}_{BC}$.

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 U_{BC} (см. рис. 2.1). На каждое из последовательно соединенных сопротивлений фаз AB и CA приходится половина линейного напряжения U_{BC} . На топографической диаграмме (рис. 2.4, a) точка A располагается на середине отрезка BC .

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

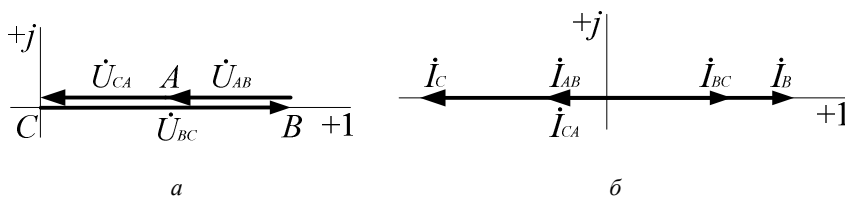


Рис. 2.4. Топографическая диаграмма напряжений (a) и векторная диаграмма токов (b) при обрыве линии A , сопротивления фаз активные

6. Контрольные вопросы и задания

1. Запишите 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 \underline{U}_{N_1N} , величина и фаза которого зависят от соотношения проводимостей фаз приемника:

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

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 равно

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

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 B и C оказываются неодинаковы, напряжение \dot{U}_{BN_1} значительно больше напряжения \dot{U}_{CN_1} .

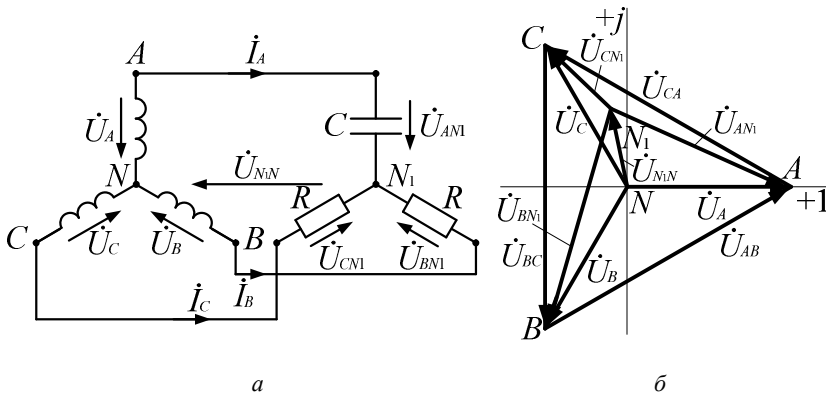


Рис. 3.1. Схема трехфазной электрической цепи с неоднородным сопротивлением фаз приемника (а) и ее топографическая диаграмма напряжений (б)

Если в фазы B и C включить две одинаковые лампы накаливания, то лампа в фазе B будет гореть ярче, чем в фазе C . 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 A , то фаза с ярко горящей лампой есть фаза B , а фаза с тускло горящей лампой – фаза C .

Если вместо конденсатора в фазу A 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 геометрическим местом концов вектора напряжения \dot{U}_{M_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).

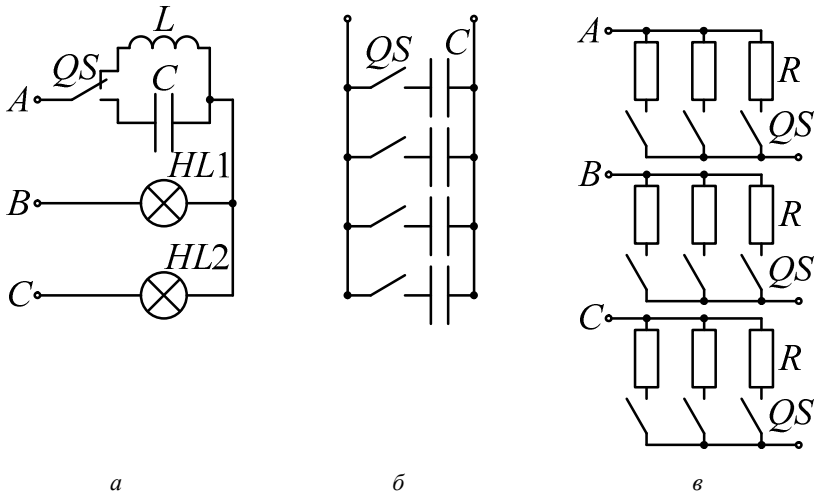


Рис. 3.2. Элементы трехфазной цепи

с неоднородным сопротивлением фаз приемника: фазоуказатель (а), набор конденсаторов (б), трехфазный резистивный приемник (в)

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).

Таблица 3.1

Значения напряжений на входе цепи

$U_{AB}, \text{В}$	$U_{BC}, \text{В}$	$U_{CA}, \text{В}$	$U_A, \text{В}$	$U_B, \text{В}$	$U_C, \text{В}$

4.3. Измерить линейные и фазные напряжения фазоуказателя для двух сопротивлений фазы A : 1) емкостное, 2) индуктивное. Отметить для обоих случаев, в какой фазе лампа горит ярче. Данные занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Значения напряжений фазоуказателя

Сопротивление фазы A	$U_{AB}, \text{В}$	$U_{BC}, \text{В}$	$U_{CA}, \text{В}$	$U_{AN1}, \text{В}$	$U_{BN1}, \text{В}$	$U_{CN1}, \text{В}$	Ярко горящая лампа
Емкостное							
Индуктивное							

4.4. Составить схему трехфазной цепи с приемником, соединенным звездой. В фазе A приемника должна быть включена переменная емкость, в фазах B и C – постоянные активные сопротивления в виде набора резисторов. В схеме следует предусмотреть амперметры для измерения фазных токов, в фазе A – на 2 А, в фазах B и C – на 1 А. Схему представить для проверки преподавателю и привести ее в отчете.

4.5. Собрать электрическую цепь по составленной схеме (п. 4.4). 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).

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

Таблица 3.3

Значения напряжений и токов приемника при изменении емкостного сопротивления фазы A

$C,$ мкФ	$U_{AB},$ В	$U_{BC},$ В	$U_{CA},$ В	$U_{AN1},$ В	$U_{BN1},$ В	$U_{CN1},$ В	$I_A,$ А	$I_B,$ А	$I_C,$ А

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 табл. 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 U_{AN_1} по фазе на 90° , так как 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 $\vec{I}_A + \vec{I}_B + \vec{I}_C = 0$.

6. Контрольные вопросы

1. Что означают неоднородные сопротивления фаз приемника?
2. Что представляет собой 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*).

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

$$\dot{\mathcal{I}}_A = \dot{\mathcal{I}}_{A0} + \dot{\mathcal{I}}_{A1} + \dot{\mathcal{I}}_{A2};$$

$$\dot{\mathcal{I}}_B = \dot{\mathcal{I}}_{B0} + \dot{\mathcal{I}}_{B1} + \dot{\mathcal{I}}_{B2};$$

$$\dot{\mathcal{I}}_C = \dot{\mathcal{I}}_{C0} + \dot{\mathcal{I}}_{C1} + \dot{\mathcal{I}}_{C2}.$$

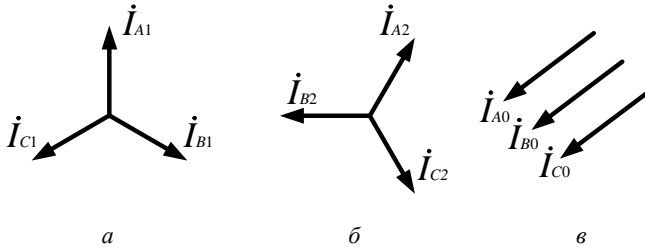


Рис. 4.1. Векторные диаграммы симметричных систем токов прямой (а), обратной (б) и нулевой (в) последовательностей

Учитывая, что

$$\dot{\mathcal{I}}_{A0} = \dot{\mathcal{I}}_{B0} = \dot{\mathcal{I}}_{C0};$$

$$\dot{\mathcal{I}}_{B1} = \dot{\mathcal{I}}_{A1} e^{-j120^\circ} = \dot{\mathcal{I}}_{A1} e^{j240^\circ}; \quad \dot{\mathcal{I}}_{C1} = \dot{\mathcal{I}}_{A1} e^{j120^\circ};$$

$$\dot{\mathcal{I}}_{B2} = \dot{\mathcal{I}}_{A2} e^{j120^\circ}; \quad \dot{\mathcal{I}}_{C2} = \dot{\mathcal{I}}_{A2} e^{-j120^\circ} = \dot{\mathcal{I}}_{A2} e^{j240^\circ},$$

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

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

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.

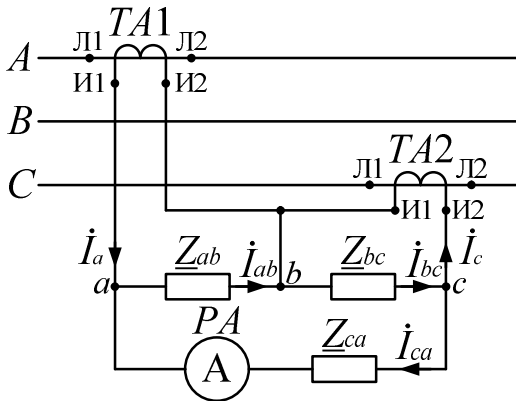


Рис. 4.2. Электрическая схема фильтра токов прямой и обратной последовательностей

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

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

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

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

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

$$\begin{aligned} \underline{I}_a &= \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \\ \underline{I}_c &= a \underline{I}_1 + a^2 \underline{I}_2. \end{aligned}$$

Подставив эти выражения в уравнение для \underline{I}_{ca} , получим

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

Отсюда 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

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

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

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

тогда

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

Фильтр для выделения составляющей обратной последовательности получаем при

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

тогда

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

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

3. Описание лабораторной установки

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

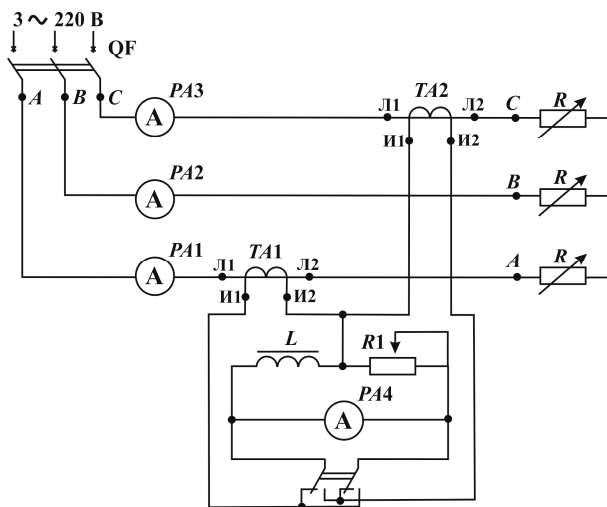


Рис. 4.3. Схема трехфазной электрической цепи с фильтром токов прямой и обратной последовательностей:

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; R_1 – переменный резистор для настройки фильтра

На стенде цифрой 1 обозначено положение переключателя для замера тока I'_1 прямой последовательности, цифрой 2 – для замера тока I'_2 обратной последовательности.

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 R_1 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. <i>Включить все резисторы в фазах</i>									
Обрыв фазы. <i>Отключить резисторы в одной из фаз по указанию преподавателя</i>									
Несимметричный <i>В фазы включить разное число резисторов</i>									

4.4. В симметричном режиме рассчитать коэффициент K_ϕ , который определяется как отношение фазного тока цепи к току I'_1 прямой последовательности, 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 системы (2).

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

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

5.1. Для расчета токов I_1 и I_2 по пункту 4.6–4.7 задания необходимо воспользоваться уравнениями системы (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 системы (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 $m_i = 0,1$ 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.

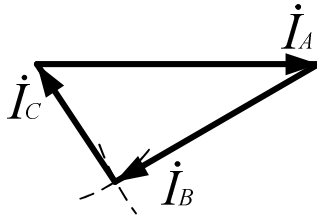


Рис. 4.4. Векторная диаграмма токов

На основании векторной диаграммы, используя уравнения системы (2), можно найти векторы токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 графически. При графическом решении системы 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.

6. Контрольные вопросы и задания

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?
5. Нарисуйте в общем виде векторные диаграммы симметричных систем токов прямой, обратной и нулевой последовательностей.
6. На основании графического определения симметричных составляющих постройте векторные диаграммы токов прямой и обратной последовательностей всех фаз.
7. Запишите выражения симметричных составляющих через векторы несимметричной системы.

Модуль 5. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Лабораторная работа № 5 ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАРЯДА И РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА

1. Цель работы

Целью работы является экспериментальное исследование переходных процессов, возникающих при заряде конденсатора и при его разряде.

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

$i = C \frac{du_C}{dt} = 0$. Конденсатор для постоянного тока представляет собой разрыв цепи, его сопротивление равно бесконечности.

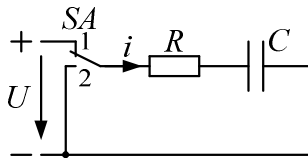


Рис. 5.1. Схема цепи R, C

Уравнение цепи согласно второму закону Кирхгофа имеет вид

$$Ri + u_C = U,$$

где u_C – переходное напряжение на конденсаторе, В;

i – переходный ток, А.

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 $p = -\frac{1}{RC}$. Следовательно,

свободная составляющая напряжения на емкости $u_{Cсв} = Ae^{-\frac{1}{RC}t} = Ae^{-\frac{t}{\tau}}$, 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

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

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

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

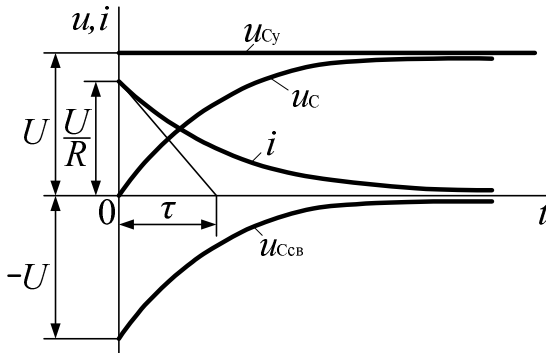


Рис. 5.2. Графики напряжения и тока при заряде конденсатора

Убывание тока и вместе с этим возрастание напряжения на емкости происходит тем быстрее, чем меньше постоянная времени τ .

В табл. 5.1 представлены значения тока в цепи, выраженные в процентах от начального (максимального) значения, для различных моментов времени.

Таблица 5.1

Процентное выражение тока цепи от времени переходного процесса

$t, \text{с}$	0	T	2τ	3τ	4τ	5τ	∞
$\frac{i}{i_{\max}} 100\%$	100	36,6	13,5	5,0	1,8	0,7	0

Как видно из рис. 5.2 и табл. 5.1, 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

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

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

При разрядке 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

$$u_{\text{св}} = 0.$$

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

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

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

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.

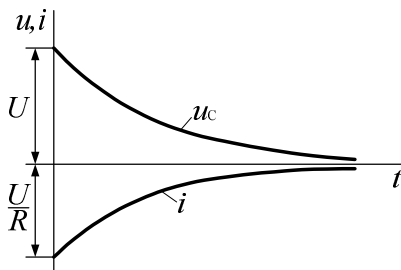


Рис. 5.3. Графики напряжения и тока при разряде конденсатора

3. Описание лабораторной установки

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

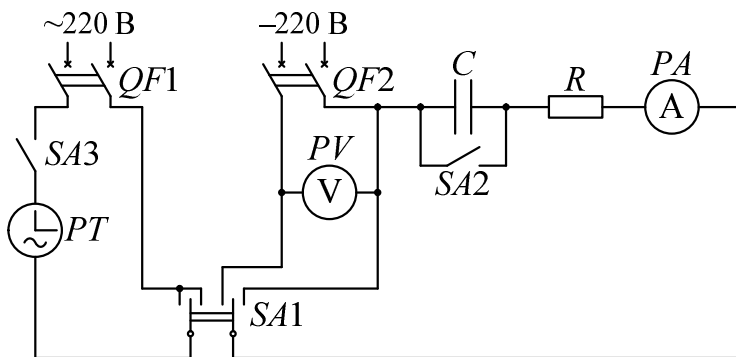


Рис. 5.4. Схема цепи R, C для исследования переходного процесса:
 PT – электрический секундомер; $SA1$ – переключатель
 с нейтральным центральным положением; PV – вольтметр (300 В);
 PA – миллиамперметр (100 мА)

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

4.1. Собрать электрическую цепь по схеме рис. 5.4. Переключатель $SA1$ поставить в нейтральное центральное положение.

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

4.3. Записать значения емкости C , сопротивления R и напряжение U источника постоянной ЭДС.

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

4.5. 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 зафиксировать 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 заряде конденсатора

i , мА						
t , с						
u_C , В						

4.6. Полностью зарядить конденсатор. Длительность зарядки должна быть не менее 5 мин. 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 определять 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 разряде конденсатора

i , мА						
t , с						
u_C , В						

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

4.8. Построить графики $i = f(t)$ и $u_C = f(t)$ при заряде конденсатора.

4.9. По данным измерений тока при разряде конденсатора вычислить соответствующие значения напряжения на конденсаторе $u_C = -Ri$ и занести их в табл. 5.3.

4.10. Построить графики $i = f(t)$ и $u_C = f(t)$ при разряде конденсатора.

4.11. 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, какое – разряду конденсатора?
4. Что понимается под зарядкой конденсатора и под разрядом конденсатора?
5. Как формулируется второй закон коммутации?
6. Что называют постоянной времени цепи R, C ? Как можно ее 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 разряде конденсатора?
9. От каких параметров цепи зависит время заряда и разряда конденсатора?

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

1. Цель работы

Целью работы является 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

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

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

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

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

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

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

$$Ri + u_C = 0.$$

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

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

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.

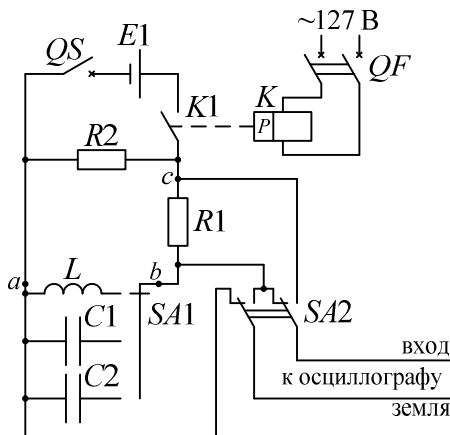


Рис. 6.1. Схема электрической цепи для исследования переходных процессов

Переходный процесс практически продолжается сотые доли секунды. Чтобы наблюдать переходный процесс на экране осциллографа, 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.

Цепь имеет две параллельные ветви: ветвь с сопротивлением $R2$ и ветвь с последовательным соединением сопротивления $R1$ и одного из элементов, подключаемого к зажимам a и b . При включении цепи процессы в каждой ветви не влияют друг на друга и на экране осциллографа 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 a 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 a и b подключен элемент L , кривые токов и напряжений двух процессов на экране осциллографа имеют вид, представленный на рис. 6.2.

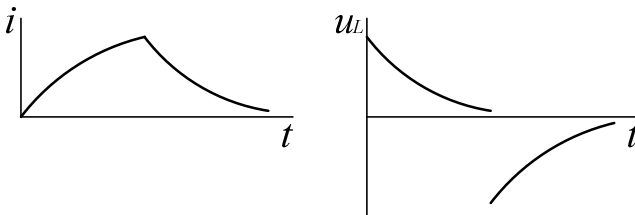


Рис. 6.2. Осциллограммы тока и напряжения при переходных процессах в цепи R, L

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

Принадлежность кривой к виду переходного процесса (включение цепи или короткое замыкание цепи) определяется на основании законов коммутации: $i_L(0) = i_L(0-) = i_L(0+)$; $u_C(0) = u_C(0-) = u_C(0+)$. При расстановке осей координат для каждой кривой необходимо

руководствоваться следующим. При включении цепи R, L ток i равен нулю в момент замыкания ключа и затем возрастает. Поэтому начало кривой $i(t)$ определяет начало осей координат (рис. 6.3, *а*).

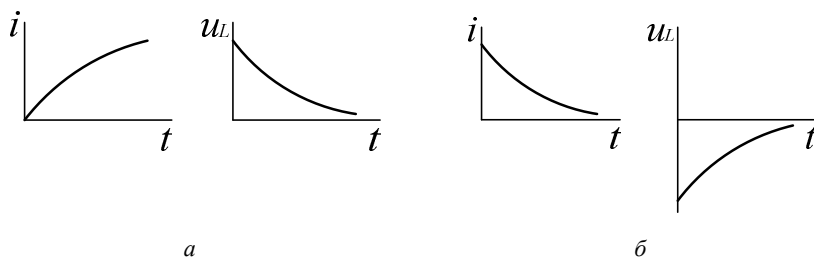


Рис. 6.3. Включение цепи R, L на постоянное напряжение (*а*) и короткое замыкание цепи R, L (*б*)

При включении цепи R, C напряжение на емкости u_C аналогично начинает возрастать с нуля. Поэтому начало кривой $u_C(t)$ также 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 $u(t)$ приближаются к оси времени t (оси абсцисс) (рис. 6.3, *б*).

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).

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

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

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

4.3. 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 ставить в положение 1:100, при наблюдении тока – 1:10.

4.4. 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).

4.5. Под каждой кривой записать ее математическое выражение.

5. Контрольные вопросы и задания

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 $i_{C\text{уст}}$ и установившееся напряжение на индуктивном элементе $u_{L\text{уст}}$ при постоянном напряжении источника питания?
8. Запишите в общем виде токи $i_{\text{св}}$ и напряжения $u_{\text{св}}$ свободного режима.
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

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗРЯДА КОНДЕНСАТОРА НА КАТУШКУ ИНДУКТИВНОСТИ И РЕЗИСТОР

1. Цель работы

Целью работы является исследование переходного процесса при разряде конденсатора на цепь R, L .

2. Общие сведения

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

Апериодический 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, В;

p_1, p_2 – корни характеристического уравнения, с^{-1} , определяются по формуле

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

Разряд конденсатора будет апериодическим, 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 $R_{кр}$.

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

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

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

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

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

Разряд конденсатора будет периодический, 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 $\Delta = e^{\delta T_{св}} = \frac{A_{m1}}{A_{m2}}$, равным отношению предыдущей амплитуды A_{m1} к последующей A_{m2} одного знака, а также логарифмическим декрементом колебаний $\ln \Delta = \delta T_{св}$, где $T_{св}$ – 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.

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).

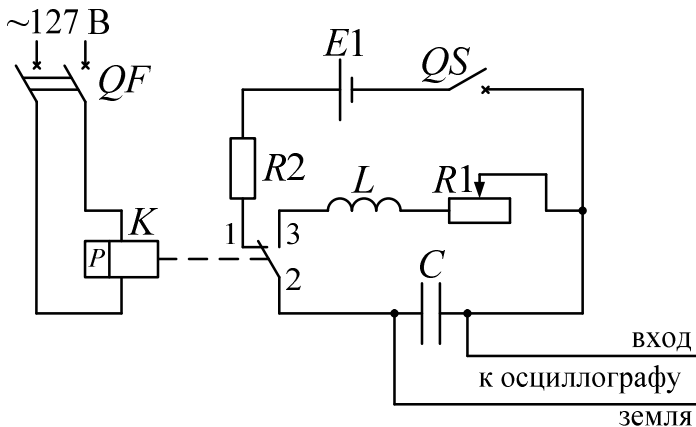


Рис. 7.1. Схема электрической цепи для исследования аperiodического и периодического разряда конденсатора

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

На панели стенда указана величина емкости C , индуктивности L , сопротивление R_k индуктивной катушки и время T_c , приходящееся на один цикл зарядки и разряда конденсатора, определяемое временем переключения контактов реле K .

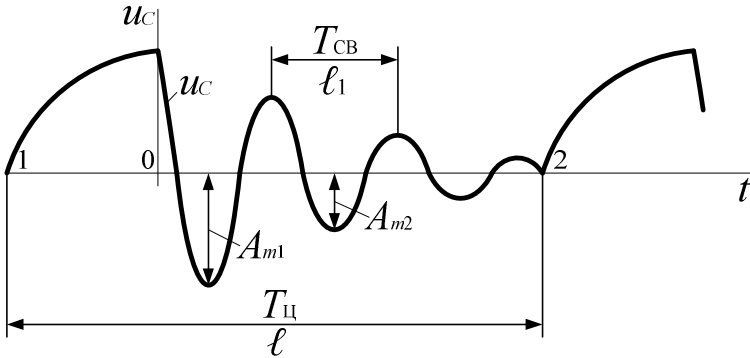


Рис. 7.2. Кривые изменения напряжения на конденсаторе при его зарядке и разряде

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Подключить к лабораторной установке осциллограф и источники питания.

4.2. Регулируя частоту развертки и усиления по вертикали осциллографа, получить на экране четкое, неподвижное изображение кривой напряжения на конденсаторе при его зарядке и разряде.

4.3. Подобрать сопротивление переменного резистора R_1 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 заряда–разряд $T_{ц}$.

Таблица 7.1

Параметры цепи при периодическом разряде конденсатора

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

4.4. Подсчитать размер l кривой цикла заряда–разряд в делениях экрана осциллографа и записать в табл. 7.2.

4.5. Измерить расстояние l_1 между двумя соседними максимумами напряжения u_C при разряде конденсатора.

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

4.7. Перерисовать кривую напряжения u_C с экрана осциллографа.

4.8. Меняя сопротивления $R1$, определить и записать критическое сопротивление $R_{кр}$, при котором периодический разряд переходит в аperiodический ($R_{кр} = R1 + R_k$, где R_k – активное сопротивление индуктивной катушки).

4.9. Установить величину сопротивления $R1$ больше критического и зарисовать кривую напряжения на конденсаторе u_C при аperiodическом разряде.

4.10. Результаты замеров внести в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Характеристики осциллограмм периодического и аperiodического разряда 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. Методические указания к обработке результатов эксперимента

5.1. Подсчитать угловую частоту $\omega_{св}$ затухающих колебаний контура R, L, C при периодическом разряде конденсатора, учитывая, что $R = R1 + R_k$. Их значения необходимо определить по табл. 7.1.

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

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

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

$$T_{св} = m_t l_1.$$

Определить $T_{\text{св}}$ расчетным путем:

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

4. Определить декремент Δ колебаний по экспериментальным данным:

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

5. Определить декремент колебаний расчетным путем:

$$\Delta = e^{\delta T_{\text{св}}},$$

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

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

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

6. Контрольные вопросы

1. Что такое апериодический и периодический разряды конденсатора?
2. При каких условиях наступают апериодический и периодический разряды?
3. Что понимают под критическим сопротивлением $R_{\text{кр}}$ 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 в цепи R, L, C ?
8. Чему равна угловая частота затухающих и незатухающих колебаний контура R, L, C ?

Модуль 6. НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ
ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.
ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ.
ПЕРЕМЕННОЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

Лабораторная работа № 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОЙ КАТУШКИ
С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ
(4 часа)

1. Цель работы

Целью работы является исследование параметров и характеристик индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником.

2. Общие сведения

Уравнение электрической цепи, содержащей индуктивную катушку с ферромагнитным сердечником, имеет следующий вид:

$$u = Ri + \frac{d(\psi_S + \psi_0)}{dt} = Ri + L_S \frac{di}{dt} + \frac{d\psi_0}{dt} = Ri + L_S \frac{di}{dt} + u_0,$$

где R – сопротивление обмотки, Ом;

L_S – индуктивность рассеяния, Гн;

$\frac{d(\psi_S + \psi_0)}{dt}$ – величина, равная ЭДС самоиндукции, наведенной

в витках катушки основным магнитным потоком Φ_0 и магнитным потоком рассеяния Φ_S (рис. 8.1).

Полное потокосцепление катушки состоит из двух составляющих: $\psi_0 = w\Phi_0$ – потокосцепления, определяемого линиями магнитной индукции, замыкающимися по сердечнику, и $\psi_S = w\Phi_S = L_S i$ – потокосцепления рассеяния, определяемого линиями магнитной индукции, замыкающимися по воздуху (w – число витков катушки).

Потокосцепление ψ_S линейно связано с током, так как магнитная проницаемость воздуха, по которому частично или полностью замыкаются линии магнитной индукции потокосцепления ψ_S , есть величина постоянная ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$ Гн/м). В отличие от ψ_S , потокосцепление ψ_0 нелинейно зависит от тока i .

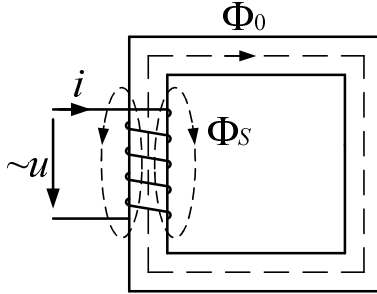


Рис. 8.1. Магнитные потоки катушки с ферромагнитным сердечником

Заменяя несинусоидальные ток, поток и напряжение u_0 эквивалентными синусоидами, получим

$$\underline{U} = R \underline{I} + j\omega L_S \underline{I} + j\omega w \frac{\Phi_{0m}}{\sqrt{2}} = R \underline{I} + jX_S \underline{I} + \underline{U}_0.$$

Этому уравнению соответствует векторная диаграмма, изображенная на рис. 8.2, а. Так как в сердечнике катушки имеются потери энергии из-за его перемагничивания и наличия вихревых токов, то угол φ_0 между векторами \underline{U}_0 и \underline{I} меньше, чем $\pi/2$. Разложив напряжение \underline{U}_0 на активную \underline{U}_{0a} и реактивную \underline{U}_{0p} составляющие, получим

$$\underline{U} = R \underline{I} + jX_S \underline{I} + \underline{U}_{0a} + \underline{U}_{0p} = R \underline{I} + jX_S \underline{I} + R_0 \underline{I} + jX_0 \underline{I},$$

где R_0 – активное сопротивление, обусловленное наличием потерь энергии в сердечнике, Ом;

X_0 – реактивное сопротивление, обусловленное наличием основного магнитного потока, Ом;

X_s – реактивное сопротивление, обусловленное потоком рассеяния, Ом.

$$\sqrt{R_0^2 + X_0^2} = Z_0, \quad Z_0 = \frac{U_0}{I}.$$

Схема замещения катушки, соответствующая полученному уравнению, представлена на рис. 8.2, б. Схемы замещения широко используются при расчете электрических цепей, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками, например, трансформаторов или электрических двигателей переменного тока.

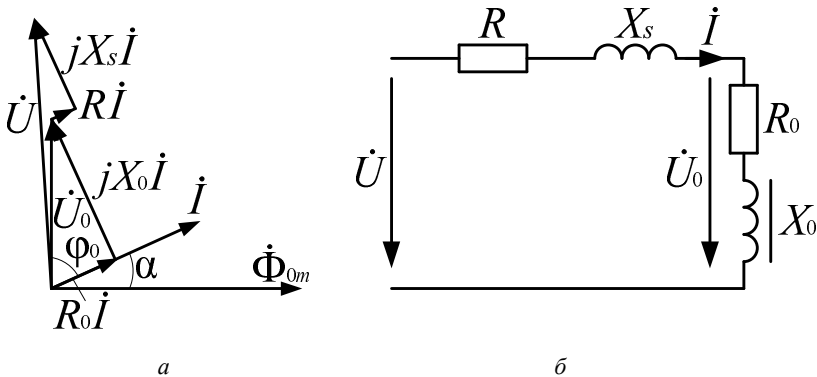


Рис. 8.2. Векторная диаграмма (а) и схема замещения (б) катушки с ферромагнитным сердечником с последовательным соединением элементов

Если ток разложить на активную I_a и реактивную I_p составляющие (рис. 8.3, а), то схема замещения катушки в этом случае приобретает вид, представленный на рис. 8.3, б, где $g_0 = \frac{I_a}{U_0} = \frac{P_c}{U_0^2}$,

$b_0 = \frac{I_p}{U_0}$ – активная и реактивная составляющие проводимости электрической цепи, учитывают соответственно потери энергии в сердечнике P_c и основной магнитный поток Φ_0 .

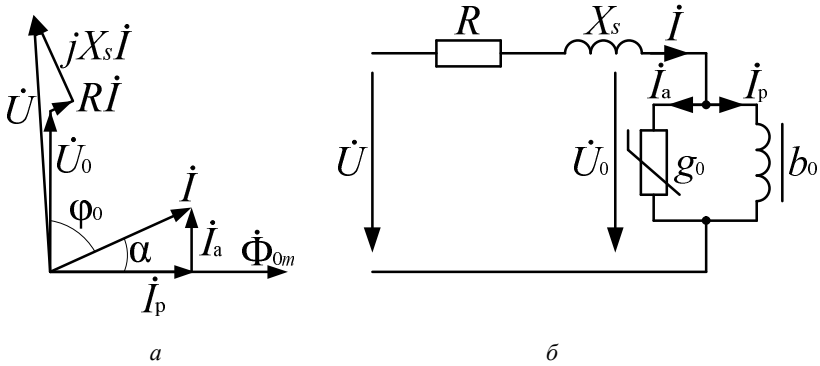


Рис. 8.3. Векторная диаграмма (а) и схема замещения (б) катушки с ферромагнитным сердечником:
 g_0 – активная проводимость; b_0 – реактивная проводимость

Проводимости могут быть выражены через сопротивления R_0 и X_0 последовательной схемы замещения:

$$\underline{Y}_0 = \frac{1}{\underline{Z}_0} = g_0 - jb_0,$$

$$g_0 = \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2}, \quad b_0 = \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2}.$$

Проводимости g_0 и b_0 являются нелинейными функциями магнитодвижущей силы (МДС) Iw и потока Φ_0 .

В свою очередь, связь между МДС Iw и потоком Φ_0 , как уже указывалось, также нелинейная. Эта связь определяется кривой намагничивания стали сердечника $B(H)$. Как видно из рис. 8.4, при больших значениях индукции B наступает насыщение, при котором приращению напряженности H магнитного поля соответствует уже значительно меньшее приращение магнитной индукции. Кривую намагничивания $B(H)$ по форме повторяет кривая $\Phi(Iw)$, поскольку соответствующие величины этих кривых связаны между собой линейными зависимостями.

Комплексная электрическая проводимость параллельных ветвей схемы замещения катушки может быть выражена следующим образом:

$$\underline{Y}_0 = \frac{\underline{I}_m}{\underline{U}_{0m}} = g_0 - jb_0 = \frac{\underline{I}_m}{j\omega W \Phi_{0m}} = \frac{\underline{I}_m W}{j\omega W^2 \Phi_{0m}} = \frac{\underline{Z}_{\text{mag}}}{j\omega W^2}.$$

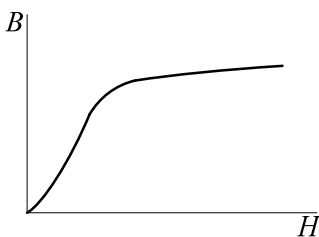


Рис. 8.4. Кривая намагничивания стали

Здесь $\underline{Z}_{\text{mag}}$ – комплексное магнитное сопротивление сердечника катушки.

$$\underline{Z}_{\text{mag}} = \frac{\underline{I}_m W}{\Phi_{0m}} = \frac{\underline{H}_m l}{\underline{B}_m S} = \frac{l}{\underline{\mu}_a S},$$

где $\underline{\mu}_a$ – комплексная магнитная проницаемость.

Приведенные выражения позволяют осуществить связь между магнитными величинами сердечника и его параметрами в схеме замещения. Магнитное сопротивление $\underline{Z}_{\text{mag}}$ определяет связь между намагничивающей силой $I W$ и создаваемым магнитным потоком.

Рассмотрим случай, когда сердечник имеет воздушный зазор. Магнитное сопротивление воздушного зазора

$$Z_{\text{mag},\delta} = \frac{\delta}{\mu_0 S},$$

где δ – величина зазора, мм.

Как известно, магнитная проницаемость воздуха значительно меньше магнитной проницаемости стали, поэтому воздушный зазор имеет значительно большее магнитное сопротивление, чем

участок той же длины из ферромагнитного материала. Наличие воздушного зазора приводит к увеличению магнитного сопротивления сердечника. Это значит, что при одном и том же токе I магнитный поток Φ_0 будет меньшим. Соответственно уменьшится и наводимая этим потоком ЭДС E_0 и равное ей напряжение U_0 . Как видно из уравнения индуктивной катушки, при неизменном напряжении U уменьшение напряжения U_0 вызовет увеличение падений напряжений RI и $X_S I$, то есть увеличение тока. Дальнейшее увеличение воздушного зазора вызовет еще большее увеличение тока.

3. Описание лабораторной установки

В данной лабораторной работе исследуются две индуктивные катушки: катушка с замкнутым ферромагнитным сердечником (рис. 8.5, *а*) и катушка с разъемным ферромагнитным сердечником (рис. 8.5, *б*). Регулирование воздушного зазора разъемного сердечника производится с помощью прокладок из гетинакса, устанавливаемых под обоими концами съемной части магнитопровода.

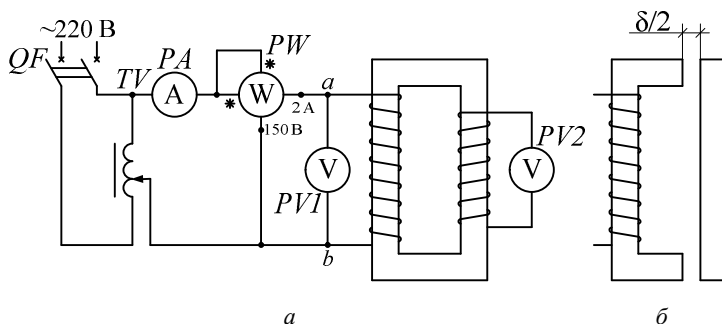


Рис. 8.5. Схема электрической цепи для исследования катушки с замкнутым (*а*) и разомкнутым (*б*) ферромагнитным сердечником: PA – амперметр, 2 А; PW – ваттметр; PV – вольтметр, 250 В; PV1 – вольтметр, 50 В

Исследуемая катушка с замкнутым сердечником имеет число витков $w = 150$, активное сопротивление обмотки $R = 6,0$ Ом. Аналогичные параметры и у катушки с разомкнутым сердечником.

Вспомогательная обмотка в катушке с замкнутым сердечником с числом витков $w_1 = 28$ служит для определения величины ЭДС $E_0 = U_0$, наводимой основным магнитным потоком.

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Исследование индуктивной катушки с замкнутым сердечником:

а) собрать цепь согласно схеме, изображенной на рис. 8.5, а. Снять вольт-амперную характеристику индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником. Изменяя напряжение от 0 до 175 В через интервалы 25 В, произвести измерения и данные занести в табл. 8.1;

Таблица 8.1

Вольт-амперная характеристика и параметры катушки с замкнутым ферромагнитным сердечником

Измерено			Вычислено			
U , В	I , А	P , Вт	$Z_э$, Ом	$R_э$, Ом	$X_э$, Ом	$L_э$, Гн

б) определить параметры схемы замещения индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником, для чего установить напряжение $U = 100$ В и произвести измерения согласно табл. 8.2.

Таблица 8.2

Параметры схемы замещения катушки с замкнутым ферромагнитным сердечником

Измерено				Вычислено										
U , В	I , А	P , Вт	U_1 , В	U_0 , В	$Z_э$, Ом	$R_э$, Ом	$X_э$, Ом	R , Ом	X_S , Ом	R_0 , Ом	X_0 , Ом	g_0 , См	b_0 , См	ϕ_0 , град

4.2. Исследование индуктивной катушки с разомкнутым сердечником.

Отсоединить катушку с замкнутым сердечником и подключить к зажимам a и b электрической цепи (рис. 8.5) катушку с разомкнутым сердечником (рис. 8.5, б).

$$Z_3 = \frac{U}{I}; \quad R_3 = \frac{P}{I^2}; \quad X_3 = \sqrt{Z_3^2 - R_3^2}; \quad R_3 = R + R_0; \quad X_3 = X_S + X_0.$$

Активное сопротивление обмотки измерено омметром и указано на панели – $R = 6,0$ Ом. ЭДС, наводимая основным потоком, и численно равное ей напряжение U_0 находятся по напряжению U_1 :

$$U_0 = U_1 \frac{w}{w_1}.$$

Число витков $w = 150$; $w_1 = 28$.

$$Z_0 = \frac{U_0}{I}; \quad R_0 = R_3 - R; \quad X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2}; \quad X_S = X_3 - X_0.$$

Угол φ_0 определяется из выражения:

$$P_c = U_0 I \cos \varphi_0.$$

$$P_c = P - P_m = P - RI^2,$$

где P_m – потери энергии в активном сопротивлении обмотки, Вт.

$$g_0 = \frac{R_0}{R_0^2 + X_0^2}; \quad b_0 = \frac{X_0}{R_0^2 + X_0^2}.$$

6. Контрольные вопросы

1. Какую роль выполняет сердечник в индуктивной катушке?
2. Почему эквивалентное сопротивление катушки зависит от величины напряжения или тока?
3. Почему увеличение воздушного зазора приводит к уменьшению эквивалентного сопротивления катушки?
4. Какие материалы используются для изготовления сердечника?
5. Какие существуют виды потерь энергии в сердечнике и от каких величин они зависят?
6. Где находит применение катушка с ферромагнитным сердечником?

Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

1. Цель работы

Целью работы является исследование свойств электрической цепи, содержащей последовательно соединенные катушку с ферромагнитным сердечником и конденсатор.

2. Общие сведения

Катушка со стальным сердечником относится к нелинейным элементам. Индуктивность ее зависит от тока, проходящего по катушке.

Если катушка со стальным сердечником и конденсатор соединены последовательно (рис. 9.1), то в цепи возможен феррорезонанс напряжений.

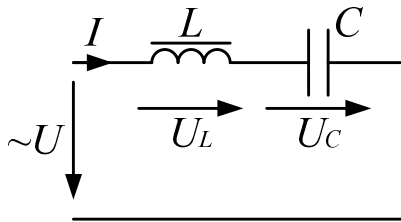


Рис. 9.1. Схема электрической цепи с последовательным соединением нелинейной индуктивной катушки и конденсатора

Феррорезонансом напряжений называют режим работы цепи, при котором первая гармоника тока в цепи совпадает по фазе с напряжением источника ЭДС.

При анализе явления феррорезонанса напряжений в целях упрощения пренебрегают потерями в стали и в активном сопротивлении обмотки, действительные кривые токов и напряжений заменяют эквивалентными синусоидами. Угол сдвига фаз между эквивалентными синусоидами тока и напряжения катушки при отсутствии потерь будет равен 90° . Значит, напряжение на индуктивности U_L находится в противофазе с напряжением на емкости U_C , так как

первое опережает по фазе ток на 90° , а второе отстает по фазе от тока на 90° . Общее напряжение \mathcal{U} , равное векторной сумме напряжений $\mathcal{U}_L + \mathcal{U}_C$, по абсолютной величине равно разности этих напряжений. Характеристики $U_L(I)$; $U_C(I)$, а также $|U_L - U_C| = f(I)$ представлены на рис. 9.2.

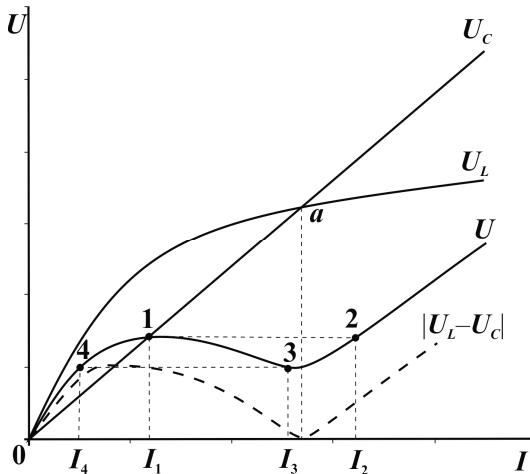


Рис. 9.2. Вольт-амперные характеристики цепи и ее элементов при феррорезонансе напряжений

Из рис. 9.2 видно, что в точке a вольт-амперные характеристики катушки $U_L(I)$ и конденсатора $U_C(I)$ пересекаются. В этой точке напряжения катушки U_L и конденсатора U_C равны по величине и противоположны по фазе, а общее напряжение их должно равняться нулю: $U = U_L - U_C = 0$. Точка a соответствует феррорезонансу напряжений.

Практически из-за наличия потерь и высших гармоник общее напряжение U не достигает нулевого значения. Фактическая характеристика цепи $U(I)$ располагается несколько выше.

В отличие от линейных электрических цепей, в которых параметры цепи постоянны, явление резонанса в цепи с катушкой с ферромагнитным сердечником и конденсатором можно получить за счет изменения величины приложенного напряжения или тока, так как при этом будет изменяться индуктивность катушки.

При изменении приложенного к данной цепи напряжения можно наблюдать характерные для феррорезонансной цепи скачки тока. Так, при увеличении напряжения ток постепенно увеличивается от 0 до значения I_1 (точка 1), а затем происходит резкое увеличение тока до значения I_2 (точка 2). Если далее уменьшать напряжение, то ток будет плавно убывать до значения I_3 , потом скачком уменьшится до величины I_4 (точка 4). Явление резкого изменения тока в цепи при незначительном изменении напряжения на входе называют триггерным, или релейным эффектом.

Кривая на участке 1–3–2 может быть получена при питании цепи не от источника напряжения, а от источника тока. Практически источник тока можно получить, включив последовательно с источником ЭДС большое сопротивление.

Угол сдвига фаз между первыми гармониками напряжения и тока в точках 1 и 4 носит индуктивный характер, в точке 2 – емкостной, а в точке 3 он близок к нулю.

3. Описание лабораторной установки

Схема электрической цепи для исследования феррорезонанса напряжений представлена на рис. 9.3.

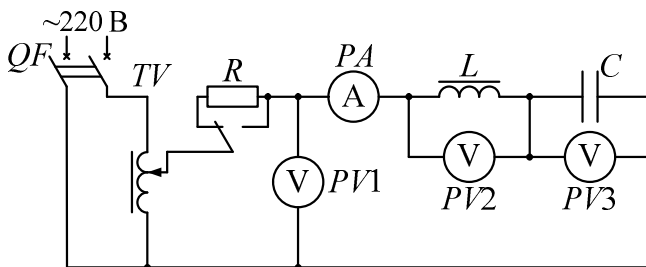


Рис. 9.3. Схема электрической цепи для исследования феррорезонанса напряжений: PV1, PV2, PV3 – вольтметры, 100, 250, 500 В; PA – амперметр, 2 А

4. Программа и методика выполнения работы

- 4.1. Собрать цепь по схеме, представленной на рис. 9.3.
- 4.2. Отключить резистор R . Постепенно увеличивая напряжение от нуля до величины, допускаемой приборами (прямой ход),

измерить ток I и напряжения U , U_L , U_C . Всего 8 измерений, среди них должны быть измерения величин непосредственно перед скачком тока и после него.

Постепенно уменьшая напряжение (обратный ход), произвести аналогичные измерения. При этом среди них должны быть измерения величин непосредственно перед скачкообразным уменьшением тока и после него.

Данные измерений занести в табл. 9.1.

Таблица 9.1

Вольт-амперные характеристики
при питании цепи от источника напряжения

Прямой ход				Обратный ход			
I , А	U , В	U_L , В	U_C , В	I , А	U , В	U_L , В	U_C , В

4.3. Включить в цепь резистор R . Включение сопротивления R в цепь равносильно увеличению внутреннего сопротивления источника напряжения, и последний может условно считаться источником тока, так как сопротивление феррорезонансной цепи мало по сравнению с внутренним сопротивлением источника.

Увеличивая ток, произвести измерения тока и напряжений. Данные измерений занести в табл. 9.2. Всего 8 измерений, среди них должны быть измерения, соответствующие уменьшению напряжения U при увеличении тока и последующему увеличению напряжения U при увеличении тока.

Таблица 9.2

Вольт-амперные характеристики при питании цепи от источника тока

I, A	U, B	U_L, B	U_C, B

4.4. По данным табл. 9.1 построить на одном рисунке графики $U(I)$; $U_L(I)$; $U_C(I)$ для прямого хода и $U(I)$ для обратного хода.

Масштаб по оси напряжений должен быть одинаковым для всех графиков.

4.5. По данным табл. 9.2 построить на одном рисунке вольт-амперные характеристики $U(I)$; $U_L(I)$; $U_C(I)$.

5. Контрольные вопросы

1. В какой цепи возможен феррорезонанс напряжений?
2. В чем состоит явление феррорезонанса напряжений?
3. Что называется триггерным, или релейным, эффектом?
4. При каком условии в феррорезонансной цепи можно получить характерные скачки тока?
5. Какое различие между феррорезонансом напряжений и резонансом напряжений в линейных цепях?

Лабораторная работа № 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ФЕРРОРЕЗОНАНСА ТОКОВ

1. Цель работы

Целью работы является исследование феррорезонансных явлений в цепи, содержащей параллельно соединенные катушку с ферромагнитным сердечником и конденсатор.

2. Общие сведения

В электрических цепях, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками и конденсаторы, наблюдаются особые явления, обусловленные нелинейными свойствами катушек с ферромагнитными сердечниками. Индуктивное сопротивление таких катушек непостоянно, оно зависит от величины тока.

Поэтому в цепях, содержащих катушку с ферромагнитным сердечником и конденсатор, резонанс наступает при определенном значении напряжения, в то время как в линейных цепях резонанс не зависит от величины напряжения, а определяется соотношением параметров цепи.

Феррорезонанс токов возникает при параллельном соединении катушки с ферромагнитным сердечником и конденсатора (рис. 10.1).

Под феррорезонансом токов понимают такой режим работы цепи, при котором реактивная составляющая первой гармоники тока I_L равна току I_C .

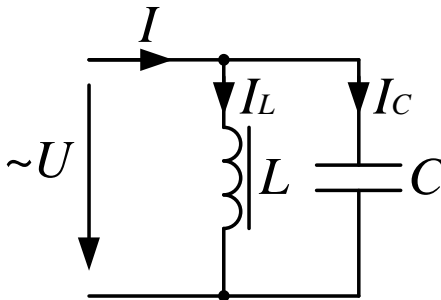


Рис. 10.1. Схема электрической цепи с параллельным соединением нелинейной индуктивной катушки и конденсатора

При анализе явления феррорезонанса с целью упрощения пренебрегают потерями в стали и в активном сопротивлении катушки и несинусоидальные кривые токов, напряжений и магнитного потока заменяют эквивалентными синусоидами.

Угол сдвига фаз между эквивалентными синусоидами напряжения и тока катушки при отсутствии потерь будет равен 90° . Значит, ток катушки I_L и ток конденсатора I_C сдвинуты по фазе на угол 180° и общий ток I по абсолютной величине равен разности значений тока катушки и тока конденсатора.

Режим, при котором токи катушки I_L и конденсатора I_C равны, т. е. взаимно скомпенсированы, соответствует феррорезонансу токов.

На рис. 10.2 показаны вольт-амперные характеристики для такой цепи, причем $U(I_L)$ изобразится нелинейной характеристикой, а $U(I_C)$ – прямой, проходящей через начало координат.

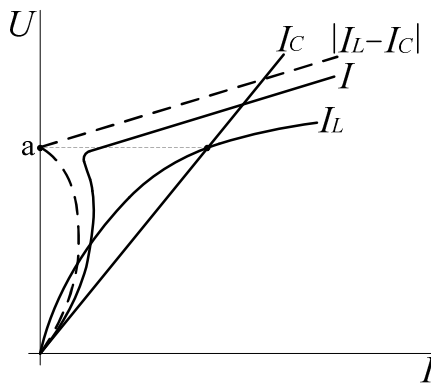


Рис. 10.2. Вольт-амперные характеристики цепи и ее элементов при феррорезонансе токов

График $U = f |I_L - I_C|$ найдем, вычитая из абсцисс кривой $U(I_L)$ соответствующие абсциссы прямой $U(I_C)$. Точка a данной характеристики, лежащая на оси ординат, является точкой феррорезонанса. Вследствие наличия в цепи потерь и высших гармоник, которыми мы пренебрегли, фактическая характеристика цепи $U(I)$ располагается несколько правее.

Если питать цепь от источника тока, то можно наблюдать характерные скачки напряжения. Если же цепь питать от плавно изменяющегося

напряжения, то, как видно по кривой $U(I)$, ток от него зависит однозначно. Никаких срывов не будет.

Ток в катушке со стальным сердечником при синусоидальном напряжении является несинусоидальным. В первом приближении его можно считать состоящим из основной синусоиды I_{L1} и третьей гармоники I_{L3} :

$$I_L = \sqrt{I_{L1}^2 + I_{L3}^2}.$$

В свою очередь, основная синусоида может быть разложена на две составляющие – активную I_{L1a} и реактивную I_{L1p} :

$$I_{L1} = \sqrt{I_{L1a}^2 + I_{L1p}^2}.$$

Таким образом, $I_L = \sqrt{I_{L1a}^2 + I_{L1p}^2 + I_{L3}^2}$.

Общий ток цепи определяется следующим соотношением:

$$I = \sqrt{(I_{L1p} - I_C)^2 + I_{L1a}^2 + I_{L3}^2},$$

где I_C – ток конденсатора, содержащий только первую гармонику, А.

Если при неизменном напряжении на зажимах катушки и конденсатора изменять емкость конденсатора и добиться таким путем резонанса основной синусоиды, т. е. компенсации реактивной составляющей основной синусоиды I_{L1p} емкостным током I_C , то общий ток цепи будет состоять лишь из активной составляющей тока катушки I_{L1a} и из третьей гармоники тока катушки I_{L3} :

$$I = \sqrt{I_{L1a}^2 + I_{L3}^2}.$$

Активная составляющая тока определяется по показаниям вольтметра и ваттметра:

$$I_{L1a} = \frac{P}{U}.$$

Вычислив активную составляющую тока, нетрудно вычислить и величину третьей гармоники тока катушки

$$I_{L3} = \sqrt{I^2 - I_{L1a}^2} .$$

Обычно амплитуда активной составляющей значительно меньше амплитуды третьей гармоники тока, так что общий ток в режиме феррорезонанса изменяется с тройной частотой.

3. Описание лабораторной установки

Схема электрической цепи для исследования феррорезонанса токов представлена на рис. 10.3.

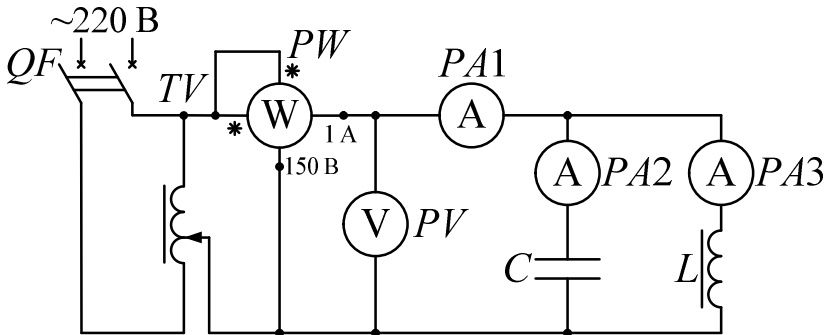


Рис. 10.3. Схема электрической цепи для исследования феррорезонанса токов:
 PA1, PA2, PA3 – амперметры, 2 А; PV – вольтметр, 150 В;
 PW – ваттметр, 1 А, 150 В

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать цепь по схеме, представленной на рис. 10.3.

4.2. Постепенно увеличивая напряжение, произвести измерения токов, напряжения и мощности. Общее число измерений 10, при этом необходимо зафиксировать значения величин, при которых общий ток начнет уменьшаться, достигнет минимума и затем вновь начнет увеличиваться. Измерения закончить при достижении током катушки значения $I_L = 2$ А.

Данные измерений занести в табл. 10.1.

Таблица 10.1

Вольт-амперные характеристики цепи

$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$I_C, \text{А}$	$I_L, \text{А}$	$P, \text{Вт}$

4.3. Увеличивая напряжение, проследить за изменением общего тока, который сначала возрастает, потом уменьшается, достигает минимального на этом участке значения и затем вновь возрастает. Установить напряжение, соответствующее минимальному значению общего тока, и, поддерживая это напряжение неизменным, получить возможное уменьшение общего тока. Показания приборов, соответствующие этому режиму, занести в табл. 10.2.

Таблица 10.2

Экспериментальное определение активной составляющей и третьей гармоники тока индуктивной катушки

Измерено					Вычислено	
$U, \text{В}$	$I, \text{А}$	$I_C, \text{А}$	$I_L, \text{А}$	$P, \text{Вт}$	$I_{L1a}, \text{А}$	$I_{L3}, \text{А}$

4.4. По данным табл. 10.1 построить на одном рисунке кривые $U(I)$, $U(I_C)$, $U(I_L)$, $U = f|I_L - I_C|$.

4.5. По данным табл. 10.2 вычислить активную составляющую тока первой гармоники катушки и третью гармонику того же тока.

5. Контрольные вопросы

1. В какой цепи возможен феррорезонанс токов?
2. В чем состоит явление феррорезонанса токов?
3. При каком условии в феррорезонансной цепи можно получить характерные скачки напряжения?
4. Какое различие между феррорезонансом токов и резонансом токов в линейных цепях?
5. Почему участок кривой $U(I)$, соответствующий феррорезонансу, не касается оси ординат?

Лабораторная работа № 11

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОЙ ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

1. Цель работы

Целью работы является исследование волновых процессов в длинной линии без потерь в установившемся режиме.

2. Общие сведения

В длинных линиях, представляющих собой цепи с распределенными параметрами, электрическое и магнитное поле распределены по всей длине линии. Превращение электромагнитной энергии в теплоту происходит на каждом элементе длины линии и также распределено по всей длине линии.

Единица длины линии характеризуется активным сопротивлением R_0 , индуктивностью L_0 , емкостью C_0 и проводимостью между проводами G_0 .

При питании линии от синусоидального источника напряжение и ток в каждой точке линии будут также синусоидальными. Однако амплитудные значения напряжения и тока в данной точке будут зависеть от расстояния точки от начала линии.

Уравнения, связывающие комплексы действующих значений напряжения и тока с координатой точки линии, имеют вид

$$\underline{U} = \underline{A}_1 e^{-\underline{\gamma}x} + \underline{A}_2 e^{\underline{\gamma}x}; \quad (1)$$

$$\underline{I} = \frac{\underline{A}_1}{\underline{Z}_c} e^{-\underline{\gamma}x} - \frac{\underline{A}_2}{\underline{Z}_c} e^{\underline{\gamma}x}, \quad (2)$$

где \underline{A}_1 и \underline{A}_2 – комплексные коэффициенты;

$$\underline{Z}_c = \sqrt{\frac{R_0 + j\omega L_0}{G_0 + j\omega C_0}} = Z_c e^{j\theta} \text{ – волновое сопротивление линии, Ом;}$$

$$\underline{\gamma} = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)} \text{ – коэффициент распространения;}$$

x – расстояние от начала линии, м.

Коэффициент распространения γ есть комплексная величина $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta$, действительную часть α называют коэффициентом затухания, а мнимую часть β – коэффициентом фазы. Если переписать уравнения (1) и (2) для мгновенных значений, то получим выражения

$$u = \sqrt{2}A_1 e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \psi_n) + \sqrt{2}A_2 e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x + \psi_0); \quad (3)$$

$$i = \frac{\sqrt{2}A_1}{Z_c} e^{-\alpha x} \sin(\omega t - \beta x + \psi_n - \theta) - \frac{\sqrt{2}A_2}{Z_c} e^{\alpha x} \sin(\omega t + \beta x + \psi_0 - \theta). \quad (4)$$

В уравнениях (3) и (4) первый член есть математическое выражение прямой или падающей волны, движущейся вдоль линии от ее начала к концу, второй член есть математическое выражение обратной или отраженной волны (волны, отраженной от сопротивления, включенного на конце линии). Обратная волна движется от конца линии к ее началу (рис. 11.1).

Амплитуды обеих волн по мере их перемещения уменьшаются вследствие потерь энергии в самой линии.

Скорость распространения волн в воздушных линиях близка к скорости света

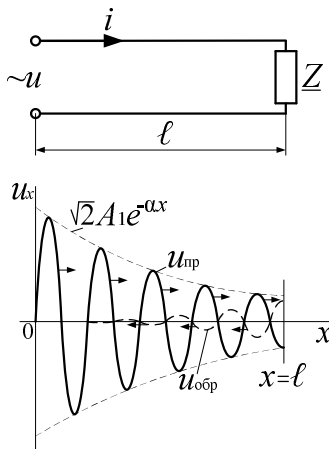


Рис. 11.1. Прямая и обратная волны напряжения

Таким образом, напряжение и ток в любой точке линии могут быть представлены как результат наложения двух бегущих в противоположные стороны волн – прямой и обратной:

$$\underline{U} = \underline{U}_{\text{пр}}(X) + \underline{U}_{\text{обр}}(X); \quad \underline{I} = \underline{I}_{\text{пр}}(X) + \underline{I}_{\text{обр}}(X).$$

Изменение действующего значения напряжения вдоль линий показано на рис. 11.2.

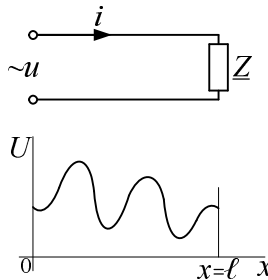


Рис. 11.2. Изменение действующего значения напряжения вдоль линии

Максимумы $U(X)$ наблюдаются практически в тех точках линии, где фазы напряжений прямой волны $u_{\text{пр}}(x)$ и обратной волны $u_{\text{обр}}(x)$ противоположны. Само собой разумеется, что максимумы и минимумы действующих значений напряжения и тока наблюдаются, если длина линии больше длины волны, что характерно для линий связи.

В линиях электропередачи промышленной частоты $f = 50$ Гц длина волны $\lambda = \frac{U}{f} = \frac{300\,000}{50} = 6000$ км, а протяженность самих линий 100–500 км, поэтому здесь такой четкой картины с максимумами и минимумами наблюдаться не будет.

Коэффициенты \underline{A}_1 и \underline{A}_2 в формулах (1) и (2) могут быть определены, например, через значения тока и напряжения в конце линии \underline{I}_2 и \underline{U}_2 . Уравнения для напряжения и тока в этом случае принимают следующий вид:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \underline{ch} \underline{\gamma} y + \underline{Z}_c \underline{I}_2 \underline{sh} \underline{\gamma} y; \quad (5)$$

$$\underline{R} = \underline{R}_2 \operatorname{ch} \underline{\gamma} y + \frac{\underline{U}_2}{\underline{Z}_c} \operatorname{sh} \underline{\gamma} y. \quad (6)$$

Здесь y – расстояние от конца линии.

Если частота источника напряжения очень велика, то может быть введено понятие линии без потерь, так как в этом случае $\omega C_0 \gg G_0$ и $\omega L_0 \gg R_0$. Конечно, потери в линии будут, но они будут весьма незначительные и ими можно пренебречь, считая $R_0 = 0$ и $G_0 = 0$.

Волновое сопротивление линии без потерь $Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ будет чисто активным и не зависящим от частоты. Коэффициент распространения $\underline{\gamma} = \alpha + j\beta = j\omega\sqrt{L_0 C_0}$ или $\beta = \omega\sqrt{L_0 C_0}$. Коэффициент затухания α будет равен нулю и затухания амплитуды напряжения и тока вдоль линии не будет. Так как $\underline{\gamma} = j\beta$, то уравнения (5) и (6) запишутся в следующей форме:

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cos \beta y + j \underline{I}_2 Z_c \sin \beta y; \quad (7)$$

$$\underline{I} = \underline{I}_2 \cos \beta y + j \frac{\underline{U}_2}{Z_c} \sin \beta y. \quad (8)$$

Если сопротивление приемника $Z = \infty$ (холостой ход), то это приводит к появлению в линии без потерь стоячих волн.

Стоячая волна есть результат наложения движущихся навстречу падающей и отраженной электромагнитных волн одинаковой интенсивности.

Действительно, полагая в формулах (7) и (8) $\underline{I}_2 = 0$ (холостой ход), будем иметь

$$\underline{U} = \underline{U}_2 \cos \beta y; \quad \underline{I} = j \frac{\underline{U}_2}{Z_c} \sin \beta y$$

или, переходя к мгновенным значениям,

$$u = \sqrt{2}U_2 \cos \beta y \sin \omega t ; i = \sqrt{2} \frac{U_2}{Z_c} \sin \beta y \sin(\omega t + 90^\circ) .$$

В обоих случаях имеем произведение синусоидальной функции расстояния на синусоидальную функцию времени – это и есть математическое выражение стоячей волны. Те точки линии, где периодическая функция расстояния ($\cos \beta y$ для напряжения и $\sin \beta y$ для тока) проходит через нуль, называют узлами, а точки линии, в которых периодическая функция расстояния принимает максимальные значения – пучностями (рис. 11.3).

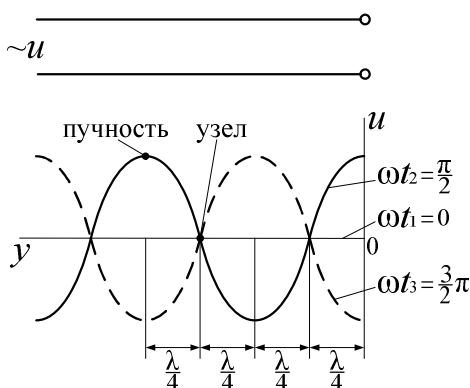


Рис. 11.3. Стоячая волна напряжения

Сдвиг во времени между стоячей волной напряжения и стоячей волной тока равен 90° . Сдвиг в пространстве между стоячей волной напряжения и стоячей волной тока равен четверти длины волны.

Изменение действующих значений напряжения и тока вдоль линии показано на рис. 11.4.

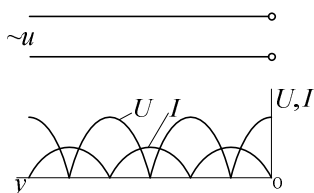


Рис. 11.4. Изменение действующих значений напряжения и тока вдоль линии

Если $\underline{Z} = 0$ (короткое замыкание), то в линии будут также стоячие волны напряжения и тока.

Аналогично будут стоячие волны, если \underline{Z} – емкостное или индуктивное сопротивление.

Если линия замкнута в конце на сопротивление $\underline{Z} = \underline{Z}_c$ (согласованная нагрузка), то обратная волна отсутствует, амплитуды напряжения и тока остаются неизменными вдоль всей линии.

1. Описание лабораторной установки

Исследуемая двухпроводная линия имеет длину $l = 5$ м и расстояние между проводами $D = 10$ см. Диаметр провода равен 3 мм. Линия питается от коротковолнового лампового генератора с длиной волны около двух метров. Частота f связана с длиной волны λ в воздухе соотношением $f = \frac{v}{\lambda}$, где $v = 3 \cdot 10^8$ м/с – скорость распространения электромагнитных волн в воздухе. При $\lambda = 2$ м имеем $f = 1,5 \cdot 10^8$ Гц.

При такой частоте медный провод, обладающий удельной проводимостью $\gamma = 5,8 \cdot 10^7$ Ом⁻¹м⁻¹ и магнитной проницаемостью $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, имеет активное сопротивление $R_0 = 0,64$ Ом/м, индуктивность $L_0 = 16,7 \cdot 10^{-7}$ Гн/м. Емкость между проводами $C_0 = 0,66 \cdot 10^{-11}$ Ф/м. Следовательно, емкостная проводимость и индуктивное сопротивление, приходящиеся на единицу длины линии, соответственно равны $\omega C_0 = 6,22$ мСм/м и $\omega L_0 = 1573$ Ом/м.

Мы видим, что индуктивное сопротивление линии при столь высоких частотах много больше ее активного сопротивления, то есть $R_0 = \omega L_0$. Активная проводимость пространства между проводами линии весьма мала по сравнению с емкостной проводимостью, то есть $G_0 = \omega C_0$. Таким образом, исследуемая линия является линией без потерь.

Волновое сопротивление линии приближенно равно

$$Z_c = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = \sqrt{\frac{16,7 \cdot 10^{-7}}{0,66 \cdot 10^{-11}}} = 504 \text{ Ом.}$$

2. Программа и методика выполнения работы

4.1. Включить высокочастотный генератор с подключенной к нему двухпроводной линией (рис. 11.5).

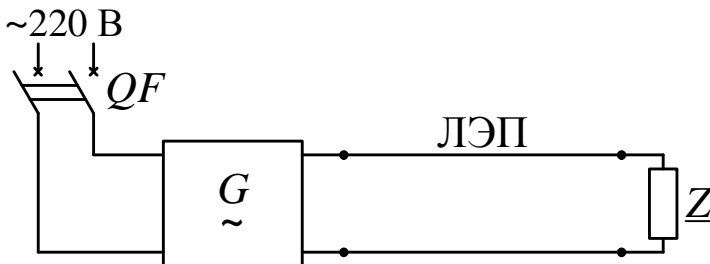


Рис. 11.5. Электрическая схема линии без потерь:
 G – генератор высокой частоты; ЛЭП – линия электропередачи

4.2. Убедиться в наличии максимумов напряжения с помощью неоновой лампочки при работе линии в режиме холостого хода и в режиме короткого замыкания.

4.3. Определить длину волны, для чего:

а) с помощью измерительного прибора найти минимумы (нули) напряжения в разомкнутой на конце линии;

б) линейкой измерить расстояние l_1 между первым и вторым минимумами, l_2 – между вторым и третьим минимумом и т. д.;

в) найти $l_{\text{ср}}$ – среднее расстояние между минимумами;

г) определить длину волны $\lambda = 2l_{\text{ср}}$.

Важно. В качестве измерительного прибора используется отрезок вспомогательной двухпроводной линии, настроенный на четверть длины волны λ . Конец измерительной линии замкнут накоротко через магнитоэлектрический прибор.

В измерительной линии устанавливается стоячая волна, имеющая в конце пучность тока, а в начале пучность напряжения и узел тока, следовательно, входное сопротивление такой линии равно бесконечности и подключение ее к проводам главной линии не оказывает влияния на процессы, происходящие в главной линии.

4.4. Произвести измерение распределения напряжения вдоль линии $U = f(y)$, где y – расстояние от конца линии, для следующих режимов линии:

- 1) линия разомкнута на конце ($Z = \infty$);
- 2) линия на конце замкнута накоротко ($Z = 0$);
- 3) линия замкнута на конденсатор с емкостью C ($Z = X_C$);
- 4) линия замкнута на катушку с индуктивностью L ($Z = X_L$);
- 5) линия замкнута на активное сопротивление R , меньшее, чем волновое ($Z = R < Z_C$);
- 6) линия замкнута на активное сопротивление R , равное волновому ($Z = R = Z_C$);
- 7) линия замкнута на активное сопротивление R , большее чем волновое ($Z = R > Z_C$).

Измерение производить, начиная с конца линии по всей длине, фиксируя значения максимумов и минимумов напряжения и их расположение (см. ниже).

Для каждого режим производить не менее 10 измерений.

Данные измерений занести в таблицы, аналогичные табл. 11.1.

По данным измерений построить кривые распределения действующих значений напряжения вдоль линии для всех исследованных режимов линии.

Таблица 11.1

Распределение напряжения вдоль линии при $Z = \infty$

$U, В$										
$y, см$										

Важно. Конец линии, доступный измерению прибором, вследствие наличия крепежных конструкций не является истинным концом линии. Действительный конец линии сдвинут в сторону крепления на 5 см.

3. Контрольные вопросы

1. Какие параметры характеризуют линию с распределенными параметрами?
2. Как распределяется действующее значение напряжения вдоль линии?
3. Что значит линия без потерь?

4. Что такое бегущие и стоячие волны?
5. В какой линии и при каких режимах возможны стоячие волны?
6. Какая связь между длиной волны и частотой?
7. Чему равно волновое сопротивление в обычной линии и в линии без потерь?
8. Как распределяется действующее значение напряжения вдоль линии без потерь: 1) при холостом ходе, 2) при включенной на конце активной нагрузке, 3) при включенной на конце согласованной нагрузке $R = Z_c$?

Лабораторная работа № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЧАСТОТЫ НА АКТИВНОЕ СОПРОТИВЛЕНИЕ ПРОВОДНИКА

1. Цель работы

Целью работы является 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, А;

S – сечение проводника, м².

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, а 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 $R_H = 2,5$ Ом и исследуемый стальной провод R_X (рис. 12.1).

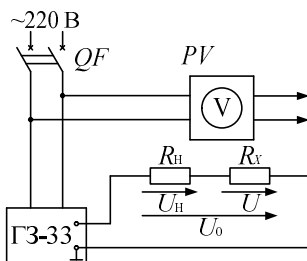


Рис. 12.1. Схема электрической цепи для исследования влияния частоты на сопротивление провода:

ГЗ-33 – звуковой генератор; PV – электронный вольтметр

4. Программа и методика выполнения лабораторной работы

4.1. Собрать цепь по схеме рис. 12.1. Установить на эталонном сопротивлении напряжение $U_n = 0,5 \text{ В}$ и в дальнейшем поддерживать его неизменным.

4.2. Измерить напряжения U_n , U и U_0 при разных частотах. Данные измерений занести в табл. 12.1.

Таблица 12.1

Зависимость сопротивления провода от частоты

Частота f , Гц	Измерено			Вычислено	
	U_n , В	U , В	U_0 , В	R , Ом	X , Ом
500					
2000					
3000					
5000					
20 000					

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 $\vec{U}_0 = \vec{U}_n + \vec{U}$, то векторы \vec{U}_0 , \vec{U}_n и \vec{U} должны образовывать замкнутый треугольник. Сначала в масштабе (рекомендуется $m_U = 0,1 \text{ В/см}$) откладывается вектор напряжения на эталонном сопротивлении \vec{U}_n (рис. 12.2). Вектор тока \vec{I} совпадает с вектором \vec{U}_n , так как R_n – активное сопротивление. Затем от начала вектора \vec{U}_n проводят дугу окружности радиусом, равным напряжению U_0 в масштабе напряжения. Аналогично с конца вектора \vec{U}_n проводят дугу радиусом, равным напряжению U . Пересечение дуг определит положение векторов \vec{U}_0 и U (рис. 12.2).

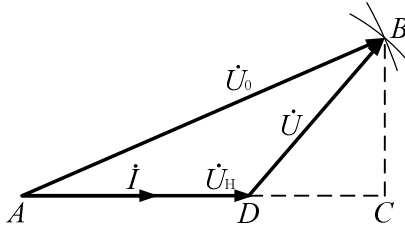


Рис. 12.2. Графическое определение активного и реактивного сопротивлений

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 $R_n = 2,5 \text{ Ом}$, а именно: $m_Z = \frac{2,5 \text{ Ом}}{AD \text{ мм}}$. Активное сопротивление стального провода определится длиной отрезка DC :

$$R = DC \cdot m_Z.$$

Индуктивное сопротивление стального провода определится длиной отрезка BC :

$$X = BC \cdot m_Z.$$

Графически определенные величины R и X внести в табл. 12.1.

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?

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи [Электронный ресурс] : учебник / Л. А. Бессонов. – 12-е изд., испр. и доп. – Электронные данные (297 676 518 байт). – М. : Юрайт, 2016. – 702 с.

2. Бессонов, Л. А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л. А. Бессонов. – М. : Юрайт, 2014. – 702 с.

3. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс. В 3 ч. Ч. 1 / сост.: А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – Минск : БГАТУ, 2008. – 353 с.

4. Теоретические основы электротехники: учебно-методический комплекс. В 3 ч. Ч. 2 / сост.: А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – Минск : БГАТУ, 2010. – 276 с.

5. Теоретические основы электротехники : учебно-методический комплекс. В 3 ч. Ч. 3 / сост.: А. В. Крутов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2011. – 321 с.

6. Теоретические основы электротехники [Электронный ресурс] : электронный учебно-методический комплекс / сост. : А. В. Крутов [и др.]. – Электронные данные (137 882 041 байт). – Минск : БГАТУ, 2018.

7. Сборник задач по электротехнике и электронике : учебное пособие / Ю. В. Бладыко [и др.] ; под общ. ред. Ю. В. Бладыко. – Минск : Вышэйшая школа, 2012. – 478 с.

8. Крутов, А. В. Теоретические основы электротехники : учебное пособие / А. В. Крутов, Э. Л. Кочетова, Т. Ф. Гузанова. – 2-е изд., стер. – Минск : РИПО, 2016. – 375 с.

Технические нормативные правовые акты

9. ГОСТ 19880–74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1975–07–01. – Минск : Госстандарт, 2013. – 28 с.

10. ГОСТ 1494–77 (СТ СЭВ 3231–81). Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. – Взамен ГОСТ 1494–61 ; введ. 1978–07–01. – М. : Издательство стандартов, 1987. – 36 с.

11. ГОСТ 2.710–81 (СТ СЭВ 2182–80) ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – Взамен ГОСТ 2.710–75 ; введ. 1981–07–01. – М. : Издательство стандартов, 1985. – 14 с.

12. ГОСТ 2.723–68 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушка индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители. – Взамен ГОСТ 7624–62 ; введ. 1971–01–01 // Обозначения условные графические в схемах : [сборник]. – М., 1970. – С. 26–40.

13. ГОСТ 2.728–74 ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. – Взамен ГОСТ 2.728–68, ГОСТ 2.729–68, ГОСТ 2.747–68 ; введ. 1975–07–01. – М. : Издательство стандартов, 2002. – 12 с.

14. 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. 1988–01–01. – М. : Издательство стандартов, 1988. – 21 с.

Учебное издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ.
ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

В двух частях

Часть 2

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

Составители:

Кругов Анатолий Викторович,
Крылова Нина Георгиевна,
Гузанова Татьяна Федоровна и др.

Ответственный за выпуск *В. А. Ковалев*
Редактор *Д. О. Бабакова*
Корректор *Д. О. Бабакова*
Компьютерная верстка *Д. О. Бабаковой*
Дизайн обложки *Д. О. Бабаковой*

Подписано в печать 26.08.2021. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,35. Уч.-изд. л. 4,18. Тираж 99 экз. Заказ 331.

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.