

МИНИСТЕРСТВО СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА
И ПРОДОВОЛЬСТВИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ

Учреждение образования
«БЕЛОРУССКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ АГРАРНЫЙ
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра электротехники

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

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

В трех частях

Часть 2

Электрические цепи однофазного синусоидального тока

Минск
БГАТУ
2015

УДК 621.3(07)
ББК 31.21я7
Т33

Составители:

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

Рецензенты:

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

Теоретические основы электротехники. Лабораторный практикум : учебно-методическое пособие. В 3-х ч. Ч. 2. Электрические цепи однофазного синусоидального тока / сост.: А. В. Крутов [и др.]. – Минск : БГАТУ, 2015. – 100 с.
ISBN 978-985-519-711-0.

Содержит лабораторные работы по разделу «Цепи однофазного синусоидального тока», включая линейные и нелинейные цепи, четырехполосники и цепь с распределенными параметрами. Представлены теоретические сведения по темам лабораторных работ, носящие справочный характер, справочные материалы по дисциплине ТОЭ, математике, методические указания по проведению экспериментов и обработки полученных результатов.

Для студентов, 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 621.3(07)
ББК 31.21я7

ISBN 978-985-519-711-0 (ч. 2)
ISBN 978-985-519-701-1

© БГАТУ, 2015

СОДЕРЖАНИЕ

ПРЕДИСЛОВИЕ.....	4
ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	5
ПРАВИЛА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ	7
Лабораторная работа № 1. ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ.....	9
Лабораторная работа № 2. РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	18
Лабораторная работа № 3. ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНИКА В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	27
Лабораторная работа № 4. РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ.....	34
Лабораторная работа № 5. РЕЗОНАНС ТОКОВ И КОМПЕНСАЦИЯ УГЛА СДВИГА ФАЗ.....	40
Лабораторная работа № 6. ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННЫМИ КАТУШКАМИ.....	46
Лабораторная работа № 7. ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА.....	54
Лабораторная работа № 8. ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФИЦИЕНТОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА.....	59
Лабораторная работа № 9. ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОЙ КАТУШКИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ.....	64
Лабораторная работа № 10. ФЕРРОРЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ.....	73
Лабораторная работа № 11. ФЕРРОРЕЗОНАНС ТОКОВ.....	78
Лабораторная работа № 12. ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОЙ ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ.....	84
ЛИТЕРАТУРА.....	94
ПРИЛОЖЕНИЕ 1.....	96

ПРЕДИСЛОВИЕ

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

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

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

При выполнении лабораторных работ необходимо строго соблюдать следующие правила безопасности.

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

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

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

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

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

о 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 пригласить преподавателя.

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

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

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

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

Лабораторная работа № 1

ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ПРИЕМНИКОВ

1. Цель работы

Экспериментальная проверка 2-го закона Кирхгофа в цепи переменного тока. Построение векторных диаграмм. Определение сопротивлений по экспериментальным данным.

2. Общие сведения

Цепь переменного тока с последовательным соединением приемников в общем случае содержит резистивный (R), индуктивный (L) и емкостный (C) элементы (рис. 1.1).

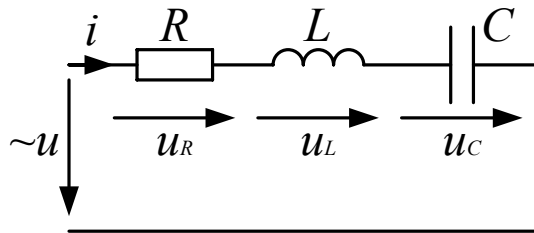


Рис. 1.1. Цепь переменного тока с последовательным соединением приемников

Дифференциальное уравнение цепи с последовательным соединением элементов R , L , C , составленное по второму закону Кирхгофа, имеет вид

$$u = u_R + u_L + u_C = Ri + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int idt,$$

где u_R – напряжение на резистивном элементе;
 u_L – напряжение на индуктивном элементе;
 u_C – напряжение на емкостном элементе.

Если ток в цепи синусоидальный $i = I_m \sin \omega t$, то напряжение на резистивном элементе $u_R = RI_m \sin \omega t$ совпадает по фазе с током, напряжение на индуктивном элементе $u_L = \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ)$ опережает по фазе ток на 90° , напряжение на емкостном элементе $u_C = \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - 90^\circ)$ отстает по фазе от тока на 90° . Таким образом, мгновенное значение напряжения на входе цепи равно:

$$u = RI_m \sin \omega t + \omega LI_m \sin(\omega t + 90^\circ) + \frac{1}{\omega C} I_m \sin(\omega t - 90^\circ).$$

Сумме синусоидальных напряжений соответствует сумма изображающих их векторов или сумма комплексных действующих напряжений.

$$\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C, \text{ или } \dot{U} = Ri + j\omega Li - j \frac{1}{\omega C} i.$$

Это соотношение представляет собой уравнение цепи (рис. 1.1), составленное по второму закону Кирхгофа в комплексной форме. В этом уравнении

$$\dot{U}_R = Ri; \quad \dot{U}_L = j\omega Li; \quad \dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} i.$$

Из этого уравнения легко получается закон Ома в комплексной форме. Выражение, стоящее в знаменателе, есть комплексное сопротивление \underline{Z} цепи с последовательным соединением элементов R , L , C .

$$\underline{Z} = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \text{ или } \underline{Z} = R + j(X_L - X_C),$$

где R – активное сопротивление;
 $X = X_L - X_C$ – реактивное сопротивление;
 $X_L = \omega L$ – индуктивное сопротивление;

$$X_C = \frac{1}{\omega C} - \text{емкостное сопротивление.}$$

Комплексные величины в законе Ома могут быть записаны в показательной форме:

$$\dot{I} = I e^{j\psi_i}, \quad \dot{U} = U e^{j\psi_u},$$

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} e^{j\varphi}$$

где $\varphi = \arctg \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{R} = \arctg \frac{X}{R}$.

$$I e^{j\psi_i} = \frac{U e^{j\psi_u}}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} e^{j\varphi},$$

$$I e^{j\psi_i} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} e^{j(\psi_u - \varphi)}.$$

Два комплексных числа равны друг другу, если равны их модули и равны их аргументы.

$$I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}; \quad \psi_i = \psi_u - \varphi.$$

Полученное выражение $I = \frac{U}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}}$ устанавливает

связь между действующими током и напряжением.

Выражение в знаменателе называется полным сопротивлением.

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2};$$

$$I = \frac{U}{Z}, \text{ откуда } Z = \frac{U}{I}.$$

Если известны действующие напряжения U_R, U_L, U_C , то $R = \frac{U_R}{I}; \quad \omega L = \frac{U_L}{I}; \quad \frac{1}{\omega C} = \frac{U_C}{I}$.

Из выражения связи между действующим током и напряжением следует

$$U^2 = R^2 I^2 + \left(\omega L I - \frac{1}{\omega C} I\right)^2,$$

откуда

$$U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}.$$

Построение векторной диаграммы тока и напряжений цепи с последовательным соединением приемников начинают с построения на комплексной плоскости вектора тока \dot{I} . Вектор напряжения $\dot{U}_R = R\dot{I}$ совпадает с направлением вектора тока \dot{I} , вектор напряжения $\dot{U}_L = j\omega L\dot{I} = \omega L\dot{I}e^{j90^\circ}$ повернут относительно вектора \dot{I} против направления движения часовой стрелки на 90° , вектор напряжения $\dot{U}_C = -j\frac{1}{\omega C}\dot{I} = \frac{1}{\omega C}\dot{I}e^{-j90^\circ}$ повернут относительно вектора

\dot{I} по направлению движения часовой стрелки на 90° . На векторной диаграмме (рис. 1.2) начальная фаза тока принята равной нулю и вектор тока i совпадает с действительной осью комплексной плоскости $\dot{I} = I$. Тогда $\dot{U}_R = U_R, \dot{U}_C = -jU_C, \dot{U}_L = jU_L$.

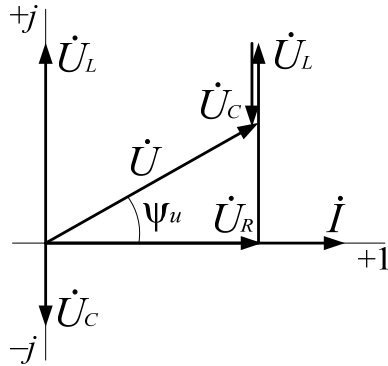


Рис. 1.2. Векторная диаграмма

Сложив векторы \dot{U}_R , \dot{U}_L и \dot{U}_C получим вектор \dot{U} . Его длина определяет действующее напряжение U , а положение относительно координатных осей – начальную фазу ψ_u . В данном случае $\psi_u = \varphi$, поскольку $\psi_i = 0$.

3. Описание лабораторной установки

Для исследования цепей переменного тока на лабораторном стенде имеется набор резисторов $R1$, $R2$, $R3$, две индуктивные катушки $L1$ и $L2$ (одна $L1$ с зажимами 1–2 и вторая $L2$ с зажимами 3–4) и батарея конденсаторов C со ступенчатым регулированием емкости. Для плавного регулирования напряжения имеется лабораторный автотрансформатор.

Зажимы этих элементов выведены на лицевую сторону панели стенда (рис. 1.3).

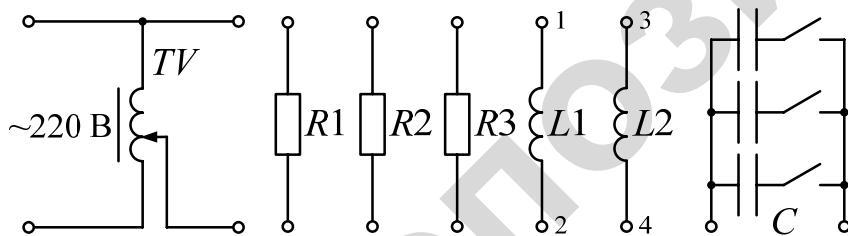


Рис. 1.3. Элементы лабораторного стенда для исследования цепей переменного тока

Для измерения синусоидальных токов на стенде имеются амперметры с пределами измерений 1–2 А.

Для измерения напряжений следует воспользоваться двумя вольтметрами. Один с пределом измерения до 250 В, как правило, используется для измерения напряжения источника питания, а второй, многопредельный, на 75–600 В – для измерения напряжения на элементах цепи.

В данной лабораторной работе неразветвленная цепь собирается из следующих элементов: резисторов $R1$ и $R2$, индуктивных катушек $L1$ и $L2$ и батареи конденсаторов C емкостью 60 мкФ. Два или более из перечисленных элементов соединяются последовательно (рис. 1.4). Лабораторный автотрансформатор TV предназначен для плавного регулирования напряжения.

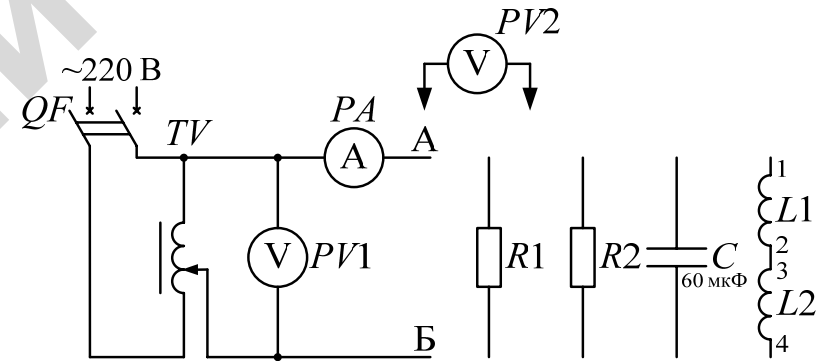


Рис. 1.4. Схема электрической цепи с последовательным соединением приемников:

PV1 – вольтметр 250 В; PV2 – вольтметр 600 В; PA – амперметр 2 А

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь согласно схеме, изображенной на рис. 1.4, подключив к зажимам АБ последовательно соединенные резисторы $R1$ и $R2$. Установить напряжение на входе цепи такое, чтобы ток в цепи равнялся $I = 1$ А, произвести измерения и данные занести в табл. 4.1. Аналогично провести измерения в цепях с другими последовательно соединенными элементами согласно табл. 1.1.

Таблица 1.1

Ток и напряжения цепи

Элементы, составляющие цепь	Измерено						
	I, A	U, B	U_{R1}, B	U_{R2}, B	U_{L1}, B	U_{L2}, B	U_C, B
$R1, R2$							
$R1, C$							
$L1, L2$							
$L1, L2, R1$							
$L1, L2, C$							

4.2. По данным измерений вычислить сопротивления элементов, входящих в цепь. Значения сопротивлений занести в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Значения сопротивлений элементов цепи

$R1, Ом$	$R2, Ом$	$X_{L1}, Ом$	$X_{L2}, Ом$	$X_C, Ом$

4.3. По значениям сопротивлений элементов определить активное, реактивное, комплексное и полное сопротивления цепи. Сравнить последнее со значением полного сопротивления, найденного по формуле $Z = \frac{U}{I}$. Приняв начальную фазу тока i равной нулю,

$\psi_i = 0, \dot{I} = I$, записать измеренные напряжения на элементах цепи в комплексной форме. По этим напряжениям определить комплексное напряжение на входе цепи, основываясь на втором законе Кирхгофа $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$. Найти модуль комплексного напряжения U , сравнить его с измеренным и убедиться в справедливости второго закона Кирхгофа. Данные расчетов занести в соответствующую строку табл. 1.3.

Таблица 1.3

Расчетные значения сопротивлений и напряжений

Номер	$R, Ом$	$X, Ом$	$Z, Ом$	$Z, Ом$	$Z = \frac{U}{I}, Ом$	\dot{U}_{R1}, B	\dot{U}_{R2}, B	\dot{U}_{L1}, B	\dot{U}_{L2}, B	\dot{U}_C, B	\dot{U}, B	U, B
1												
2												
3												
4												
5												

4.4. Построить векторные диаграммы для каждого пункта табл. 1.3. На векторных диаграммах указать угол φ .

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

При построении векторных диаграмм по п. 4.4 рабочего задания за исходный вектор следует принять вектор тока \dot{I} и направить его по горизонтальной оси. Векторы напряжений проводятся в масштабе $m_U = 20 \frac{B}{см}$. Вектор \dot{U}_R совпадает по направлению с вектором тока \dot{I} , вектор \dot{U}_C отстает от вектора тока (повернут по часовой стрелке) на угол 90° , и вектор напряжения \dot{U}_L опережает вектор тока \dot{I} (повернут против часовой стрелки) на угол 90° .

Вектор общего напряжения \dot{U} находится в результате суммирования векторов в соответствии с уравнением Кирхгофа $\dot{U} = \dot{U}_R + \dot{U}_L + \dot{U}_C$. Длина вектора \dot{U} определяет значение действующего напряжения на входе цепи U . Угол между векторами \dot{U} и \dot{I} есть угол φ .

6. Контрольные вопросы

1. Какова связь между мгновенными значениями тока и напряжения на активном сопротивлении R , на индуктивности L , на емкости C ?

Лабораторная работа № 2

РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Экспериментальная проверка законов Кирхгофа в цепи переменного тока. Построение векторных диаграмм. Определение сопротивлений по экспериментальным данным.

2. Общие сведения

Цепь с параллельным соединением приемников

При параллельном соединении приемников напряжение на каждом из них одно и то же, поскольку они подключены к одним и тем же двум узлам (рис. 2.1). Пусть сопротивления приемников равны:

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L; \quad \underline{Z}_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C}.$$

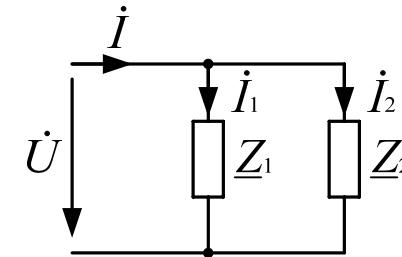


Рис. 2.1. Параллельное соединение приемников

При анализе цепей с параллельным соединением приемников удобно пользоваться комплексными проводимостями. Комплексная проводимость есть величина, обратная комплексному сопротивлению.

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}}$$

2. Каков сдвиг фаз напряжения и тока на активном сопротивлении R , на индуктивности L , на емкости C ? Сформулируйте и запишите второй закон Кирхгофа в комплексной форме.

3. Запишите закон Ома в комплексной форме и соотношение между действующими значениями напряжения и тока.

4. Запишите выражение комплексного сопротивления и полного сопротивления.

5. В каких пределах может изменяться угол φ электрической цепи? Что означает $\varphi > 0$ и $\varphi < 0$?

6. Объясните построение векторных диаграмм в данной работе.

7. Для ниже приведенной электрической цепи дано:

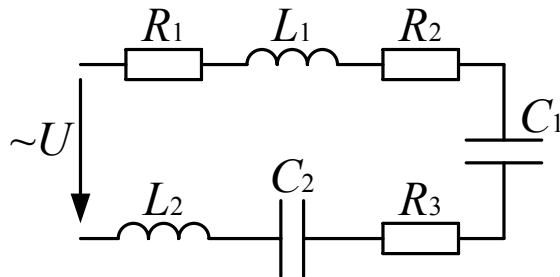
$$U = 100 \text{ В}; \quad f = 50 \text{ Гц}; \quad R_1 = 2 \text{ Ом};$$

$$R_2 = 1 \text{ Ом}; \quad R_3 = 3 \text{ Ом};$$

$$L_1 = 15,9 \text{ мГн}; \quad L_2 = 31,8 \text{ мГн};$$

$$C_1 = 636 \text{ мкФ}; \quad C_2 = 1590 \text{ мкФ}.$$

Определите \underline{Z} , Z , I , φ , постройте векторную диаграмму тока и напряжений на каждом элементе цепи.



или

$$\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}e^{j\varphi}} = Ye^{-j\varphi} = Y(\cos\varphi - j\sin\varphi) = g - jb,$$

где g – активная проводимость;
 b – реактивная проводимость;
 Y – полная проводимость.

$$Y = \sqrt{g^2 + b^2}; \quad \cos\varphi = \frac{g}{Y}; \quad \sin\varphi = \frac{b}{Y}; \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{b}{g}.$$

Закон Ома при использовании проводимости имеет вид

$$\dot{I} = \underline{Y}\dot{U} \quad \text{или} \quad \dot{I} = (g - jb)\dot{U}.$$

Для цепи, представленной на рис. 2.1,

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{R_1 + j\omega L} = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L)^2} - j \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = g_1 - jb_1;$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{R_2 - j \frac{1}{\omega C}} = \frac{R_2}{R_2^2 + (\frac{1}{\omega C})^2} + j \frac{\frac{1}{\omega C}}{R_2^2 + (\frac{1}{\omega C})^2} = g_2 + jb_2.$$

Согласно первому закону Кирхгофа

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2, \quad \underline{Y}\dot{U} = \underline{Y}_1\dot{U} + \underline{Y}_2\dot{U}.$$

Откуда общая комплексная проводимость цепи с параллельным соединением приемников

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2; \quad \underline{Y} = (g_1 + g_2) - j(b_L - b_C) = g - jb,$$

где $g = g_1 + g_2$; $b = b_L - b_C$.

Общее комплексное сопротивление цепи $\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}}$. В частном слу-

чае, когда цепь состоит из двух параллельно соединенных приемников,

$$\underline{Z} = \frac{1}{\underline{Y}} = \frac{1}{\underline{Y}_1 + \underline{Y}_2} = \frac{1}{\frac{1}{\underline{Z}_1} + \frac{1}{\underline{Z}_2}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

Для проверки первого закона Кирхгофа по экспериментальным данным необходимо иметь комплексные выражения напряжения и токов.

Если начальная фаза напряжения не задана, то, как правило, она принимается равной нулю – $\psi_u = 0$. Тогда $\dot{U} = U$ и вектор напряжения \dot{U} совпадает с направлением вещественной оси комплексной плоскости. Для записи токов ветвей в комплексной форме определяют вначале разность фаз напряжения и тока каждой ветви φ :

$$\varphi_1 = \operatorname{arctg} \frac{X_1}{R_1} = \operatorname{arctg} \frac{X_L}{R_1};$$

$$\varphi_2 = \operatorname{arctg} \frac{X_2}{R_2} = \operatorname{arctg} \frac{-X_C}{R_2}.$$

Угол φ_2 будет отрицательным. Затем определяют начальную фазу тока $\psi_{i_1} = \psi_u - \varphi_1 = -\varphi_1$; $\psi_{i_2} = \psi_u - (-)\varphi_2 = \varphi_2$.

Токи в комплексной форме имеют вид:

$$\dot{I}_1 = I_1 e^{-j\varphi_1}, \quad \dot{I}_2 = I_2 e^{j\varphi_2} - \text{показательная форма записи}$$

или $\dot{I}_1 = I_1' - jI_1''$; $\dot{I}_2 = I_2' + jI_2''$ – алгебраическая форма записи.

В последних выражениях

$$I_1' = I_1 \cos\varphi_1; \quad I_1'' = I_1 \sin\varphi_1; \quad I_2' = I_2 \cos\varphi_2; \quad I_2'' = I_2 \sin\varphi_2.$$

Согласно первому закону Кирхгофа

$$\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = (I_1' + I_2') + j(-I_1'' + I_2'') = I' + jI''.$$

Действующее значение $I = \sqrt{(I')^2 + (I'')^2}$. Ток \dot{I} может быть определен с помощью векторной диаграммы цепи.

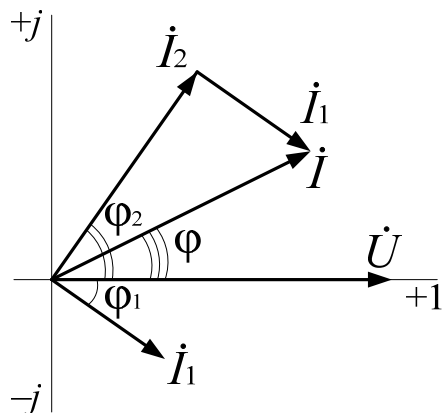


Рис. 2.2. Векторная диаграмма напряжения и токов

Построив векторы токов \dot{I}_1 и \dot{I}_2 и затем сложив их, получим вектор тока \dot{I} . Длина вектора \dot{I} есть действующий ток. На векторной диаграмме вектор тока \dot{I}_1 сдвинут относительно вектора напряжения \dot{U} по часовой стрелке (отстает), так как угол φ_1 положительный, а вектор тока \dot{I}_2 сдвинут относительно вектора напряжения \dot{U} против часовой стрелки (опережает), так как угол φ_2 отрицательный.

Цепь со смешанным соединением приемников

Токи в цепи со смешанным соединением приемников рассчитываются путем преобразования схемы. Заменяем параллельно соединенные приемники одним эквивалентным с проводимостью

$Y_{23} = Y_2 + Y_3$ или с сопротивлением $Z_{23} = \frac{1}{Y_{23}}$. После этого преобразования схема состоит из двух последовательно соединенных участков с сопротивлениями Z_1 и Z_{23} . Общее сопротивление цепи

$$Z = Z_1 + Z_{23}; \quad Z = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z_2} + \frac{1}{Z_3}} = Z_1 + \frac{Z_2 \cdot Z_3}{Z_2 + Z_3}.$$

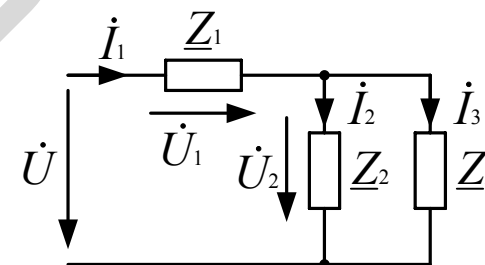


Рис. 2.3. Цепь со смешанным соединением приемников

Зная общее сопротивление, находим ток на входе $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z}$. Затем найдем напряжение \dot{U}_2 из уравнения, составленного по второму закону Кирхгофа $0 = \dot{U}_1 + \dot{U}_2 - \dot{U}$; $\dot{U}_2 = \dot{U} - \dot{U}_1 = \dot{U} - Z_1 \dot{I}_1$.

Зная напряжение \dot{U}_2 , находим токи ветвей $\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}_2}{Z_2}$; $\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_2}{Z_3}$.

Векторная диаграмма строится по комплексным значениям токов и напряжений.

3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования служат цепи с параллельным соединением приемников (рис. 2.4, а, б, в) и цепи со смешанным соединением приемников (рис. 2.4, с, d). Каждая из этих цепей поочередно под-

ключается к зажимам «А» и «В» (рис. 2.4). Емкость конденсатора C для каждой схемы равна 60 мкФ. Лабораторный автотрансформатор TV предназначен для регулирования напряжения на входе цепи.

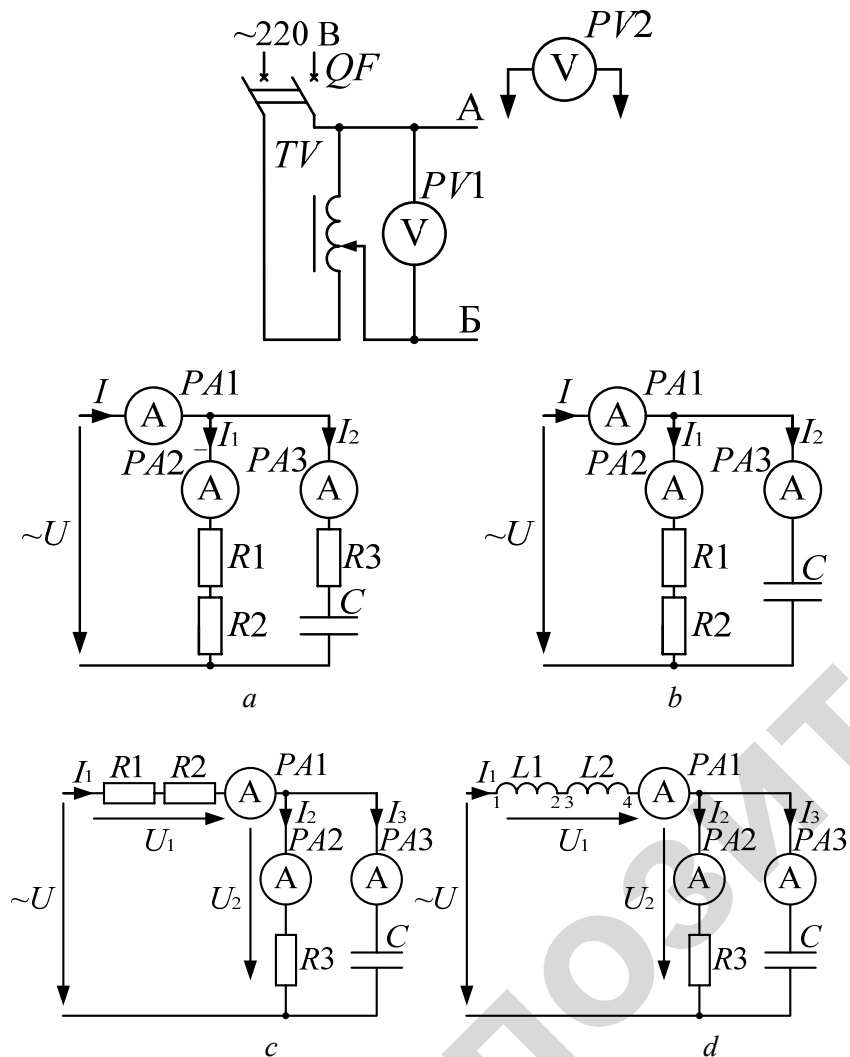


Рис. 2.4. Схемы электрических цепей с параллельным и со смешанным соединением приемников:

PA1, PA2, PA3 – амперметры 2 А; PV1 – вольтметр 250 В; PV2 – вольтметр 600 В

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь с параллельным соединением приемников согласно схеме, изображенной на рис. 2.4, *a*.

Установить напряжение на входе цепи $U = 60$ В. Произвести измерения и данные занести в табл. 2.1.

4.2. В схеме цепи рис. 2.4, *a* исключить резистор $R3$, оставив во второй ветви только конденсатор C (рис. 2.4, *b*), произвести измерения и данные занести в табл. 2.1.

Таблица 2.1

Напряжения и токи на элементах цепи с параллельным соединением приемников

Схема	Измерено							
	U , В	U_{R1} , В	U_{R2} , В	U_{R3} , В	U_C , В	I , А	I_1 , А	I_2 , А
<i>a</i>								
<i>b</i>								

4.3. По экспериментальным данным вычислить сопротивления элементов, входящих в цепь, и по ним определить Z_1 ; Z_2 ; Z ; Z . Сравнить полное сопротивление Z со значением полного сопротивления, полученного по формуле

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

Приняв начальную фазу напряжения равной нулю $\psi_i = 0$, записать измеренные токи I_1 и I_2 в комплексной форме

$$\dot{I}_1 = I_1 e^{-j\varphi_1}; \dot{I}_2 = I_2 e^{-j\varphi_2}$$

Записав комплексные токи \dot{I}_1 и \dot{I}_2 в алгебраической форме, определить комплекс тока \dot{I} , основываясь на первом законе Кирхгофа $\dot{I} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2$. Найти модуль комплекса тока I , сравнить его с измеренным и убедиться в справедливости первого закона Кирхгофа.

Данные вычислений занести в табл. 2.2. Проведенные расчеты привести в отчете.

Таблица 2.2

**Расчетные значения сопротивлений и токов цепи
с параллельным соединением приемников**

Схема	$Z_1,$ Ом	$Z_2,$ Ом	$Z_3,$ Ом	$Z,$ Ом	$Z = \frac{U}{I},$ Ом	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I,$ А	$I,$ А
<i>a</i>									
<i>b</i>									

4.4. Построить векторную диаграмму токов и напряжения цепи с параллельным соединением приемников для обеих схем.

Смешанное соединение приемников

4.5. Собрать цепь со смешанным соединением приемников (рис. 2.4, *c*). Установить напряжение на входе цепи $U = 150$ В. Произвести измерения и данные занести в табл. 2.3.

4.6. В схеме цепи (рис. 2.4, *c*) два последовательно соединенные резисторы $R1$ и $R2$ заменить двумя последовательно соединенными индуктивными катушками $L1$ и $L2$ (рис. 2.4, *d*). Произвести измерения и данные занести в табл. 2.3.

Таблица 2.3

**Токи, напряжения и сопротивления цепи
при смешанном соединении приемников**

Схема	Измерено						Вычислено					
	$U,$ В	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$I_1,$ А	$I_2,$ А	$I_3,$ А	$Z_1,$ Ом	$Z_2,$ Ом	$Z_3,$ Ом	$Z,$ Ом	$Z,$ Ом	$Z = \frac{U}{I},$ Ом
<i>c</i>												
<i>d</i>												

4.7. По экспериментальным данным найти Z_1 ; Z_2 ; Z_3 ; Z и Z . Сравнить полное сопротивление со значением полного сопротивления, полученного из выражения $Z = \frac{U}{I}$. Совпадение обоих значений означает, что в данной цепи выполняются оба закона Кирхго-

фа, поскольку расчетное значение полного сопротивления было найдено на основании именно этих законов.

4.8. Построить векторную диаграмму токов и напряжений цепи со смешанным соединением приемников для обеих схем. Рекомендуется принять начальную фазу напряжения \dot{U}_2 равной нулю $\psi_{i2} = 0$, тогда $\dot{U}_2 = U_2$ и вектор \dot{U}_2 совпадает по направлению с действительной осью комплексной плоскости. Затем строят векторы токов \dot{I}_2 и \dot{I}_3 под углом $-\varphi_2$ и $-\varphi_3$. По ним находят вектор $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$. После этого строят вектор напряжения \dot{U}_1 . Он будет сдвинут относительно вектора \dot{I}_1 на угол φ_1 . Сложив векторы \dot{U}_1 и \dot{U}_2 , получим вектор напряжения $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_2$.

Рассматриваемые цепи представлены элементами R, L, C , поэтому угол сдвига фаз напряжения и тока каждой ветви находится легко: для элемента R $\varphi = 0$, для элемента L $\varphi = 90^\circ$ и для элемента C $\varphi = -90^\circ$.

Рекомендуемый масштаб напряжения $m_u = 20$ В/см, масштаб тока $m_I = 0,4$ А/см.

Лабораторная работа № 3

ИЗМЕРЕНИЕ МОЩНОСТИ И ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРИЕМНИКА В ЦЕПИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Изучение схем измерения и методов расчета активной, реактивной и полной мощностей и параметров приемника в цепи синусоидального тока.

2. Общие сведения

Пусть напряжение, приложенное к зажимам цепи, и ток в этой цепи выражаются соответственно уравнениями:

$$u = U_m \sin \omega t,$$
$$i = I_m \sin(\omega t - \varphi).$$

Мгновенная мощность, получаемая приемником цепи, находится как произведение мгновенных значений напряжения и тока

$$p = ui = U_m I_m \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) = UI \cos \varphi - UI \cos(2\omega t - \varphi).$$

Из полученного выражения видно, что мгновенная мощность состоит из двух составляющих: постоянной $UI \cos \varphi$ и переменной $UI \cos(2\omega t - \varphi)$. Мгновенная мощность положительна, когда у напряжения u и тока i одинаковые знаки, т. е. когда действительные направления напряжения и тока в цепи одинаковы. Мгновенная мощность p отрицательна, когда у напряжения и тока разные знаки, т. е. когда действительные направления напряжения и тока в цепи противоположны.

Когда мгновенная мощность p положительна, энергия поступает от источника в приемник, а когда мгновенная мощность отрицательна, энергия возвращается из приемника источнику. Такой возврат энергии источнику питания возможен в цепи, содержащий индуктивность L и емкость C , так как энергия периодически запасает-

ся в магнитных и электрических полях этих элементов цепи.

Мгновенная мощность дает наиболее полную характеристику энергетических процессов цепи.

Активная мощность P есть среднее значение мгновенной мощности за период T :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T p dt = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt.$$

Подставляя выражение мгновенной мощности p , получим формулу активной мощности синусоидального тока:

$$P = UI \cos \varphi.$$

Множитель $\cos \varphi$ носит название коэффициента мощности.

Активная мощность P физически представляет собой энергию, которая выделяется в единицу времени в виде теплоты на участке цепи с сопротивлением R .

Так как $\cos \varphi = \frac{R}{Z} = \frac{g}{Y}$, то активная мощность может иметь еще следующие выражения:

$$P = I^2 R = U^2 g.$$

Активная мощность измеряется в ваттах (Вт).

При расчетах электрических цепей пользуются также понятием реактивная мощность, которая определяется по формуле

$$Q = UI \sin \varphi.$$

Для выяснения понятия реактивной мощности рассмотрим цепь переменного тока с катушкой без активного сопротивления, т.е. с чистой индуктивностью. В такой цепи отсутствует необратимое преобразование электрической энергии в теплоту, в то же время включенная в цепь катушка представляет собой элемент с концентрированным магнитным полем. Так как магнитное поле переменное, то в моменты его нарастания цепь поглощает энергию, а в моменты убывания поля энергия возвращается обратно источнику. Таким

образом, в такой цепи имеет место процесс обмена энергией между приемником и источником.

Реактивная мощность характеризует ту часть энергии, которая колеблется между приемником и источником.

Так как $\sin\varphi = \frac{X}{Z}$, то величина реактивной мощности в цепи переменного тока может быть выражена следующим образом:

$$Q = I^2 X.$$

Реактивная мощность измеряется в вольт-амперах реактивных (вар). Если $\sin\varphi > 0$, то $Q > 0$, если $\sin\varphi < 0$, то $Q < 0$.

Так как $X = X_L - X_C$, то

$$Q = I^2 (X_L - X_C) = I^2 X_L - I^2 X_C = Q_L - Q_C.$$

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

$$S = UI.$$

Математически произведение $UI = S$ представляет наибольшую возможную активную мощность P , которую можно получить при заданных значениях U и I и при сдвиге фаз $\varphi = 0$, т. е. при $\cos\varphi = 1$.

Так как $U = Z \cdot I$, $I = YU$, то $S = I^2 Z = U^2 Y$.

Полная мощность измеряется в вольт-амперах (В·А).

Между P , Q и S существует соотношение $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$. Графически эту связь можно представить в виде прямоугольного треугольника (рис. 3.1).

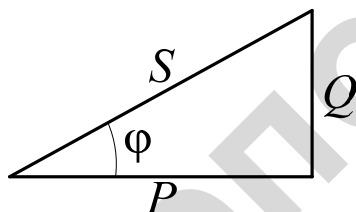


Рис. 3.1. Треугольник мощностей

По измеренным или вычисленным значениям тока I , напряжения U и мощности P приемника легко определяются параметры приемника R , X , Z .

$$Z = \frac{U}{I}, \quad R = \frac{P}{I^2}, \quad R = Z \cos\varphi, \quad X = \sqrt{Z^2 - R^2}.$$

Реактивное сопротивление $X > 0$, если $X_L > X_C$, и $X < 0$, если $X_L < X_C$.

3. Описание лабораторной установки

Для измерения величин, предусмотренных программой работы на лабораторном стенде имеются ваттметр, фазометр, амперметр на 2 А и вольтметр на 250 В.

Ваттметр – прибор для измерения мощности. В лаборатории используется многопредельный ваттметр электродинамической системы. Ваттметр имеет две катушки – напряжения и тока. Катушка напряжения включается параллельно участку цепи, подобно вольтметру, ее зажимы на лицевой стороне ваттметра отмечены буквой U . Токковая катушка включается в цепь последовательно, подобно амперметру, ее зажимы отмечены буквой I . Один зажим токовой катушки и один зажим катушки напряжения отмечают звездочками – это генераторные зажимы. При измерении активной мощности эти зажимы должны включаться со стороны источника энергии.

Ваттметр устроен так, что измеряет значение $UI \cos\varphi (\angle \dot{U} \dot{I})$, где U и I – действующие напряжение и ток, подведенные к ваттметру, $\angle \dot{U} \dot{I}$ – угол сдвига фаз между ними.

Цена деления многопредельного ваттметра вычисляется по формуле

$$C_W = \frac{U_n I_n}{n},$$

где U_n , I_n – номинальные напряжение и ток ваттметра, указанные на лицевой стороне прибора;

n – число делений всей шкалы.

Активная мощность, измеряемая ваттметром,

$$P = n_{\text{изм}} \cdot C_W,$$

Таблица 3.1

где $n_{\text{изм}}$ – число делений шкалы, указываемое стрелкой прибора.

Фазометр – прибор для измерения угла φ сдвига фаз напряжения и тока. На лицевой стороне фазометра, также как у ваттметра, имеются зажимы для подключения напряжения U и тока I , между которыми определяется сдвиг фаз. Два зажима также являются генераторными и отмечены звездочками. Схема включения фазометра в электрическую цепь аналогична включению ваттметра. Устройство фазометра таково, что в нерабочем состоянии стрелка прибора занимает произвольное положение на шкале.

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь согласно схеме, изображенной на рис. 3.2.

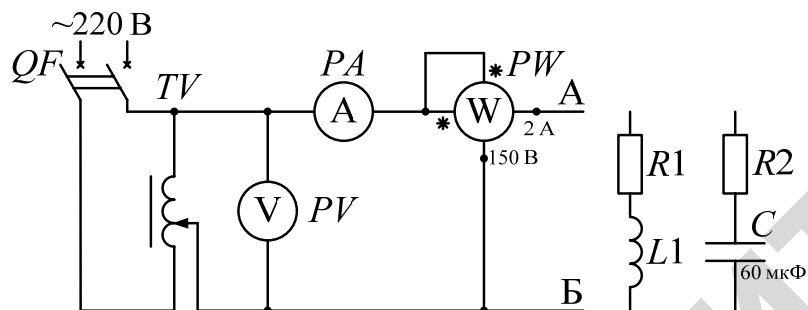


Рис. 3.2. Схема электрической цепи для измерения мощности и параметров приемника:

PV – вольтметр, 250 В; PA – амперметр, 2 А; PW – многопредельный ваттметр; TV – автотрансформатор

4.2. Подключая к зажимам АБ поочередно приемники $R1, L1$ и $R2, C$ и оба этих приемника, соединенных последовательно, и устанавливая в каждом из трех случаев при помощи автотрансформатора ток $I = 2$ А, записать показания приборов в табл. 3.1.

Измерение мощности и параметров приемников с помощью ваттметра

Приемник	Измерено			Вычислено				
	I , А	U , В	P , Вт	S , ВА	Q , вар	Z , Ом	R , Ом	X , Ом
$R1, L1$								
$R2, C$								
$R1, L1, R2, C$								

4.3. Включить в электрическую цепь вместо ваттметра фазометр. Рекомендуется выбрать для фазометра предел измерения по току 5 А и по напряжению 220 В. Переключатель прибора «генератор-приемник» должен быть в положении «приемник».

4.4. Повторить пункт 4.2. программы. Записать показания приборов в табл. 3.2. Угол φ следует записать с учетом знака: $\varphi_{\text{инд}} > 0$, $\varphi_{\text{емк}} < 0$.

Таблица 3.2

Измерение мощности и параметров приемников с помощью фазометра

Приемник	Измерено				Вычислено					
	I , А	U , В	φ , град	$\cos\varphi$	S , ВА	P , Вт	Q , вар	Z , Ом	R , Ом	X , Ом
$R1, L1$										
$R2, C$										
$R1, L1, R2, C$										

4.5. Вычислить величины, указанные в таблицах. Расчетные формулы привести в отчете.

4.6. Построить в масштабе треугольник мощностей для приемника $R1, L1$.

5. Контрольные вопросы

1. Запишите выражение мгновенной мощности цепи переменного тока.
2. Запишите, как определяется активная мощность.

Лабораторная работа № 4

РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

1. Цель работы

Исследование резонансного режима в неразветвленной электрической цепи, содержащей резистор, индуктивную катушку и конденсатор. Исследование зависимостей тока и напряжения на элементах цепи от емкости конденсатора. Построение векторных диаграмм методом засечек.

2. Общие сведения

Резонансом называется такой режим пассивной цепи, содержащей катушки индуктивности и конденсаторы, при котором ее входное сопротивление является чисто активным. При резонансе ток совпадает по фазе с напряжением на входе цепи.

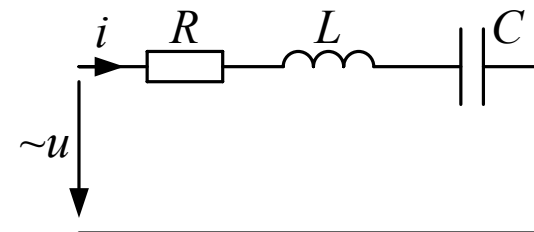


Рис. 4.1. Цепь с последовательным соединением элементов R, L, C

Полное сопротивление Z цепи (рис. 4.1) равно:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2} = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}.$$

Для такой цепи резонанс наступит при условии, что реактивное сопротивление $X = X_L - X_C = 0$ или индуктивное сопротивление цепи должно равняться емкостному сопротивлению $\omega L = \frac{1}{\omega C}$.

В этом случае полное сопротивление цепи будет чисто активным ($Z = R$).

При $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ противоположные по фазе напряжения на индук-

тивном элементе U_L и на емкостном элементе U_C равны по величине (рис. 4.2). Поэтому резонанс в рассматриваемой цепи называют резонансом напряжений.

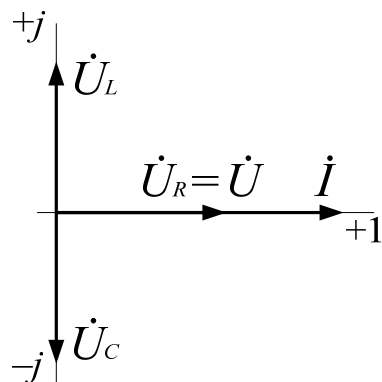


Рис. 4.2. Векторная диаграмма при резонансе напряжений

Полное сопротивление Z при $X_L = X_C$ минимально, поскольку оно равно только активному сопротивлению цепи, а ток I при заданном напряжении U достигает наибольшего значения $I = \frac{U}{R}$.

Напряжения на индуктивном и емкостном элементах при резонансе могут превысить по величине напряжение сети, на которое подключена вся схема, во столько раз, во сколько раз $X_L = X_C$ больше активного сопротивления R . Это может вызвать повреждение приборов и элементов цепи из-за пробоя изоляции. Кроме того, повышенное напряжение опасно для обслуживающего персонала.

Однако, благодаря этим же свойствам – максимальному току и повышенным напряжением на индуктивности и емкости – резонанс напряжений находит широкое применение в радиотехнике и технике связи.

Из условия $\omega L = \frac{1}{\omega C}$ следует, что резонанса можно достичь,

изменяя либо частоту напряжения источника, либо параметры цепи – индуктивность или емкость. Угловая частота, при которой наступает резонанс, называется резонансной угловой частотой:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

С энергетической стороны при резонансе полная мощность $S = UI$ равна активной мощности $P = UI \cos \varphi$, поскольку угол $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R} = 0$ и $\cos \varphi = 1$. Реактивная мощность индуктивно-

го элемента и реактивная мощность емкостного элемента одинаковы: $Q_L = Q_C = 0$. Между конденсатором и катушкой индуктивности происходит обмен энергией. Энергия электрического поля переходит в энергию магнитного поля и обратно.

Энергия, поступающая в цепь от источника питания, в любой момент времени целиком переходит в теплоту в активном сопротивлении.

3. Описание лабораторной установки

Исследуемая неразветвленная цепь собирается из резистора $R1$, двух индуктивных катушек, соединенных между собой зажимами 2–3, и батареи конденсаторов. Цепь присоединяется к лабораторному автотрансформатору, предназначенному для плавного регулирования напряжения. Зажимы этих элементов выведены на лицевую сторону панели стенда (рис. 4.3).

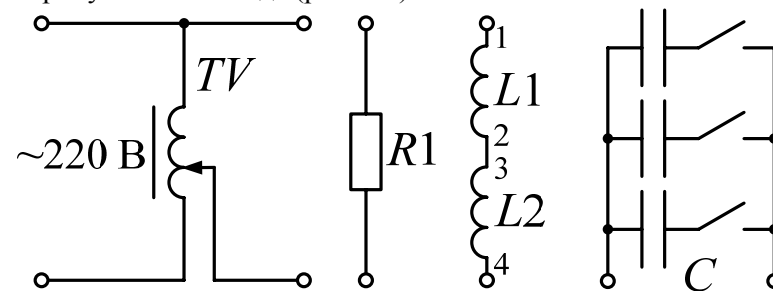


Рис. 4.3. Элементы лабораторного стенда для исследования резонанса напряжений

Для измерения величин, предусмотренных программой работы, на стенде имеются фазометр, амперметр с пределом измерений 2 А и два вольтметра, один с пределом измерения до 250 В для измерения напряжения на входе цепи и второй – до 600 В в качестве переносного для измерения напряжения на индуктивно-резистивном приемнике и конденсаторе.

Две индуктивные катушки должны быть соединены последовательно зажимами 2 и 3 для создания большего индуктивного сопротивления. Резистор R1 необходим для ограничения тока в режиме резонанса. Переменная емкость батареи конденсаторов позволит создать резонансный режим.

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Руководствуясь разделами 2 и 3, самостоятельно составить схему электрической цепи для исследования резонанса напряжений. В схеме должны быть предусмотрены амперметр для измерения тока, вольтметр для измерения напряжения на входе цепи, фазометр для измерения угла φ и $\cos\varphi$, переносной вольтметр. Подготовить таблицу для записи измерений.

4.2. Собрать электрическую цепь для исследования резонанса напряжений. Чтобы избежать больших напряжений на зажимах катушек и батареи конденсаторов, установить в цепи при помощи автотрансформатора напряжение $U = 80$ В. Во время проведения опыта напряжение поддерживать неизменным.

4.3. Изменяя емкость батареи конденсаторов от 0 до 60 мкФ, измерить ток I , напряжение U_k на участке, содержащем индуктивные катушки с последовательно включенным резистором R1, напряжение U_C на батарее конденсаторов, $\cos\varphi$ и угол φ . Угол φ следует записывать с учетом знака: $\varphi_{\text{инд}} > 0$, $\varphi_{\text{емк}} < 0$. Всего выполнить не менее 8 измерений, из них одно должно соответствовать режиму резонанса, при котором значение угла $\varphi = 0$ и ток имеет максимальное значение. Число измерений до резонанса и после него должно быть примерно одинаковым. Напряжение U_k измеряется на участке, содержащем индуктивные катушки и последовательно включенный резистор R1. Отдельно напряжение на резисторе R1 трудно измерить, так как оно слишком мало.

4.4. Для резонансного режима электрической цепи вычислить

полное сопротивление всей цепи $Z = \frac{U}{I}$, активное сопротивление

всей цепи $R = Z\cos\varphi$, полное сопротивление на участке с индуктивными катушками $Z_k = \frac{U_k}{I}$, индуктивное сопротивление

$X_L = \sqrt{Z_k^2 - R^2}$ и емкостное сопротивление $X_C = \frac{U_C}{I}$.

4.5. Построить на одном рисунке графики зависимостей $U(C)$; $U_k(C)$; $U_C(C)$; $I(C)$; $\cos\varphi(C)$.

4.6. По результатам измерений построить векторные диаграммы тока и напряжений для трех режимов работы цепи: а) до резонанса, б) при резонансе, в) после резонанса.

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

5.1. При выполнении пункта 4.5 задания рекомендуется масштаб по горизонтальной оси для емкости $m_c = 4 \frac{\text{мкФ}}{\text{см}}$, по вертикальной

оси масштаб для напряжения $m_u = 20 \frac{\text{В}}{\text{см}}$; масштаб тока

$m_i = 0,2 \frac{\text{А}}{\text{см}}$ и для коэффициента мощности в 1 см 0,2 единицы.

5.2. При построении векторных диаграмм рекомендуется масштаб напряжения $m_u = 40 \frac{\text{В}}{\text{см}}$.

Построение векторных диаграмм необходимо начинать с вектора тока. Вектор напряжения на конденсаторе отстает от вектора тока на 90° . Положение вектора напряжения \dot{U}_k , поскольку он содержит активную и индуктивную составляющие, можно найти следующими способами. Первый способ – метод засечек. Из точки 0 векторной диаграммы проводится дуга окружности радиусом, равным в масштабе напряжению U , а из конца вектора \dot{U}_C дуга окружности радиусом, равным в масштабе напряжению \dot{U}_k (рис. 4.4).

Лабораторная работа № 5

РЕЗОНАНС ТОКОВ И КОМПЕНСАЦИЯ СДВИГА ФАЗ

1. Цель работы

Исследование режима резонанса токов в электрической цепи с параллельным соединением ветвей. Исследование зависимости тока на входе цепи и коэффициента мощности от емкости конденсатора.

2. Общие сведения

Резонанс токов имеет место при параллельном соединении ветвей с емкостными и индуктивными элементами (см. рис. 5.1).

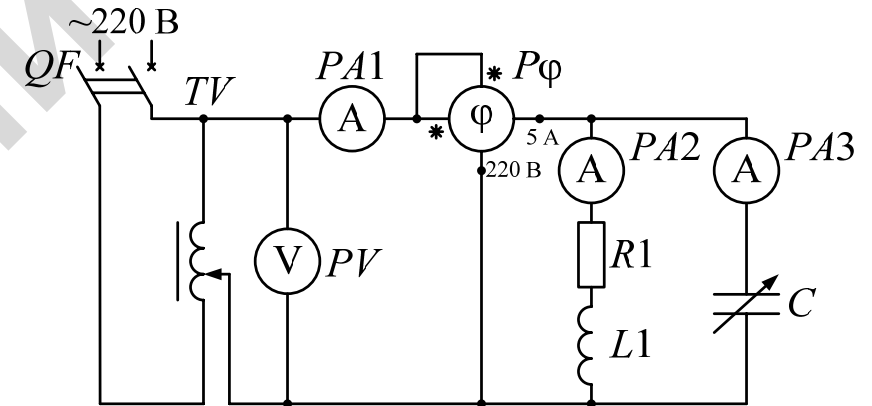


Рис. 5.1. Схема цепи для исследования резонанса токов:
PV – вольтметр 250 В; PA1, PA2 – амперметры 1 А;
PA3 – амперметр 2 А; P – фазометр

Явление, происходящее в цепи (рис. 5.1), можно наглядно представить с помощью векторной диаграммы (рис. 5.2).

Ток I_2 в приемнике R_1, L отстает от приложенного напряжения U на угол φ_2 . Ток I_3 в конденсаторе C опережает напряжение на 90° . Общий ток I_1 в неразветвленной части цепи равен векторной сумме токов обеих ветвей:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3.$$

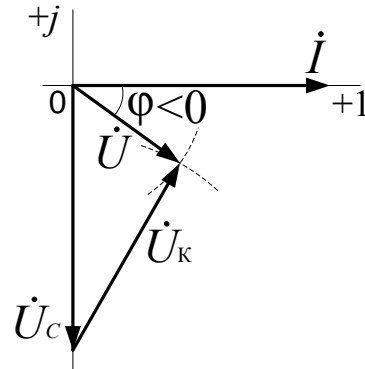


Рис. 4.4. Векторная диаграмма

В точке пересечения дуг окружностей сходятся векторы \dot{U} и \dot{U}_k .

Такое построение основано на том, что $\dot{U} = \dot{U}_c + \dot{U}_k$.

Второй способ учитывает, что для напряжения U известна не только величина, но и угол φ сдвига по отношению к вектору тока \dot{I} . Если $\varphi > 0$, то вектор \dot{U} направляется в сторону опережения (против часовой стрелки) по отношению к вектору \dot{I} , если $\varphi < 0$, то в сторону отставания (по часовой стрелке).

Вектор напряжения \dot{U}_k проводится в соответствии с уравнением

$$\dot{U}_k = \dot{U} - \dot{U}_c.$$

6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение резонансного режима в электрической цепи.
2. Каково условие резонанса в цепи с последовательным соединением элементов R, L, C ?
3. Почему резонанс в последовательной цепи носит название резонанса напряжений?
4. К каким нежелательным явлениям и почему может привести резонанс напряжений?
5. Каким образом достичь резонанса при последовательном соединении элементов R, L, C ?
6. Какова особенность резонанса напряжений с энергетической стороны?

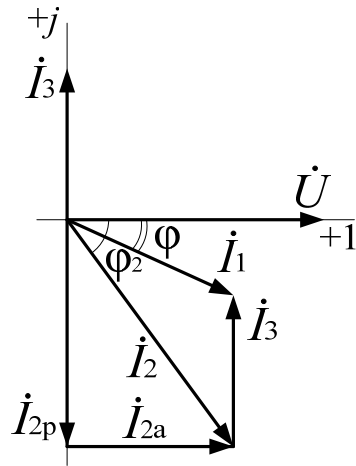


Рис. 5.2. Векторная диаграмма токов и напряжения

При отсутствии конденсатора общий ток равнялся бы току I_2 . Как видно из векторной диаграммы, при параллельном подключении конденсатора к приемнику R, L , во-первых, уменьшается общий ток цепи I_1 , во-вторых, уменьшается угол φ между общим током I_1 и напряжением, следовательно, увеличивается коэффициент мощности $\cos \varphi$.

Уменьшение угла сдвига фаз напряжения на приемнике и общего тока называют *компенсацией сдвига фаз*.

Практически целесообразность уменьшения угла φ заключается в одновременном уменьшении общего тока I_1 , что приводит к снижению потерь мощности в линии, соединяющей потребитель с источником, так как потери в линии пропорциональны квадрату тока.

Минимальную величину общего тока можно получить в том случае, когда ток в конденсаторе будет равен реактивной составляющей тока I_2 :

$$I_3 = I_2 \cdot \sin \varphi_2 = I_{2p}; \quad I_3 = I_{2p}.$$

Эти токи будут полностью компенсировать друг друга благодаря тому, что имеют сдвиг по фазе на 180° . Этот случай носит название резонанса токов. При резонансе общий ток в неразветвленной части

цепи совпадает по фазе с напряжением, т. е. становится чисто активным, угол $\varphi = 0$, $\cos \varphi = 1$.

С увеличением тока в конденсаторе сверх необходимого для компенсации реактивной составляющей тока I_2 общий ток будет расти, угол φ приобретает отрицательное значение и увеличивается, коэффициент мощности уменьшается.

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

$$I_1 = UY = U\sqrt{g^2 + (b_L - b_C)^2},$$

где U – напряжение, приложенное к цепи;

Y – полная проводимость цепи;

$$g – \text{активная проводимость ветви } R, L; \quad g = \frac{R_1}{R_1^2 + (\omega L)^2};$$

b_L – индуктивная проводимость ветви R, L ;

$$b_L = \frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2};$$

b_C – емкостная проводимость ветви с емкостью; $b_C = \omega C$.

Изменяя или индуктивность L , или емкость C , или сопротивление R , или частоту питающего напряжения, можно достичь того, что b_L будет равняться b_C , и тогда общий ток $I_1 = Ug$ становится чисто активным. Это соответствует режиму резонанса. Следовательно, условие резонанса токов можно записать как $b_L = b_C$ или

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \omega C.$$

В частном случае, когда можно пренебречь активным сопротивлением катушки индуктивности, условием резонанса становится равенство $\frac{1}{\omega L} = \omega C$ или $\omega L = \frac{1}{\omega C}$. В этом частном случае ток

в неразветвленной части цепи равен нулю. Это значит, что притока энергии извне нет, но в замкнутом контуре, образуемом двумя ветвями, ток проходит. В этом контуре происходит непрерывное превращение энергии электрического поля, запасенного конденсатором, в энергию магнитного поля, запасаемую катушкой, и обратно.

Явление резонанса токов используется для увеличения коэффициента мощности электрических установок, в радиотехнике и технике связи.

3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования служит цепь с параллельным соединением ветвей. Первая ветвь содержит индуктивную катушку $L1$ и резистор $R1$, вторая – батарею конденсаторов со ступенчатым регулированием емкости (рис. 5.1).

Исследуемая цепь присоединяется к лабораторному автотрансформатору, предназначенному для плавного регулирования напряжения.

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь для исследования резонанса токов (рис. 5.1).

4.2. Установить напряжение 70 В и поддерживать его неизменным.

4.3. Изменяя емкость батареи конденсаторов от 0 до 60 мкФ, произвести не менее 8 измерений, из них одно должно соответствовать режиму резонанса, при котором угол $\varphi = 0$ и общий ток приобретает наименьшее значение. Число измерений до резонанса и последнего должно быть примерно одинаковым. Угол следует записывать с учетом знака: $\varphi_{\text{инд}} > 0$, $\varphi_{\text{емк}} < 0$. Данные измерений занести в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Напряжение, токи и коэффициент мощности цепи

Измерено							Вычислено				
C	U	I_1	I_2	I_3	φ	$\cos\varphi$	Y	g	Y_2	b_L	b_C

4.4. Для резонансного режима электрической цепи необходимо вычислить полную проводимость цепи $Y = \frac{I_1}{U}$, активную проводимость $g = Y \cdot \cos\varphi$, полную проводимость ветви с индуктивной катушкой $Y_2 = \frac{I_2}{U}$, индуктивную проводимость $b_L = \sqrt{Y_2^2 - g^2}$ и емкостную проводимость $b_C = \frac{I_3}{U}$.

4.5. Построить на одном рисунке графики зависимостей $I_1(C)$; $I_2(C)$; $I_3(C)$; $\cos\varphi(C)$.

4.6. По результатам измерений в масштабе построить векторные диаграммы токов и напряжения для трех режимов цепи: а) до резонанса; б) резонанса; в) после резонанса.

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

При построении векторных диаграмм и графиков рекомендуется масштаб для тока $m_i = 0,2 \frac{\text{А}}{\text{см}}$.

Построение векторных диаграмм необходимо начинать с вектора напряжения. Вектор емкостного тока \dot{I}_3 проводится под углом 90° к вектору напряжения в сторону опережения. Положение вектора тока \dot{I}_2 , поскольку он содержит активную и реактивную составляющие, находится методом засечек. Для этого из точки 0 векторной диаграммы проводится окружность радиусом, равным в масштабе I_1 , а из конца вектора \dot{I}_3 – окружность радиусом, равным в масштабе I_2 . Векторы \dot{I}_1 и \dot{I}_2 должны сходиться в точке пересечения окружностей (рис. 5.3). Такое построение основано на том, что $\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3$.

Вектор тока \dot{I}_2 можно разложить на активную и реактивную составляющие. Активная составляющая \dot{I}_{2a} параллельна вектору напряжения, реактивная \dot{I}_{2p} отстает от вектора напряжения на 90° .

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3.$$

Лабораторная работа № 6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ С ИНДУКТИВНО-СВЯЗАННЫМИ КАТУШКАМИ

1. Цель работы

Исследовать явление взаимной индукции на примере двух индуктивно-связанных катушек. Определить опытным путем взаимную индуктивность M и одноименные зажимы этих катушек.

2. Общие сведения

При достаточно близком расположении двух катушек может оказаться, что часть магнитного потока, создаваемого током первой катушки, будет сцепляться с витками второй катушки, и наоборот, часть магнитного потока, создаваемого током второй катушки, будет сцепляться с витками первой катушки. В этом случае говорят, что катушки магнитно-связанные (индуктивно-связанные) (рис. 6.1).

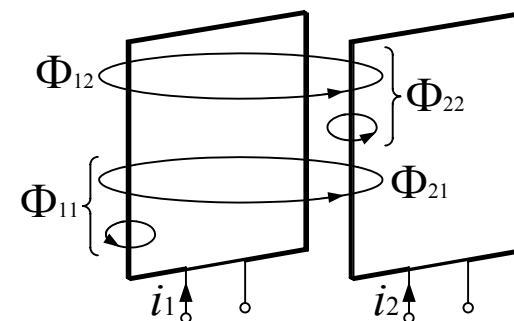


Рис. 6.1. Индуктивно-связанные катушки

При протекании по катушкам переменного тока магнитные потоки будут переменными и в катушках, кроме ЭДС самоиндукции будет наводиться ЭДС взаимной индукции e_M .

Наведение ЭДС в контуре (катушке) при изменении тока в соседнем контуре называют взаимной индукцией. ЭДС взаимной индук-

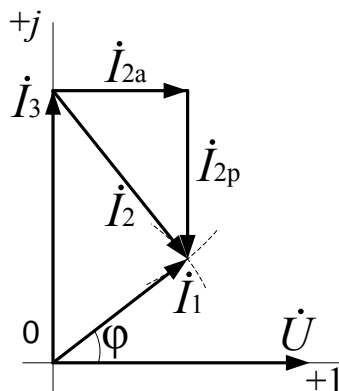


Рис. 5.3. Векторная диаграмма

Второй способ построения векторных диаграмм основан на том, что из эксперимента известен угол φ между общим током I_1 и напряжением U . В этом случае построение векторных диаграмм также нужно начинать с вектора напряжения \dot{U} . Вектор тока \dot{I}_3 направляется в сторону опережения под углом 90° , а вектор \dot{I}_1 под углом φ к напряжению \dot{U} .

Если $\varphi > 0$, то вектор общего тока \dot{I}_1 отстает от вектора напряжения; если $\varphi < 0$, то вектор \dot{I}_1 опережает вектор напряжения \dot{U} . Вектор тока \dot{I}_2 находится в соответствии с уравнением

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_1 - \dot{I}_3.$$

6. Контрольные вопросы

1. Какое явление называют резонансом токов? В каких цепях возможен резонанс токов?
2. Каково условие резонанса токов, каким образом можно достичь резонанса токов?
3. Для какой цепи и каким образом осуществляется компенсация сдвига фаз?
4. Объясните построение векторной диаграммы токов методом засечек.

ции первой катушки $e_{M1} = \left| M \frac{di_2}{dt} \right|$, второй катушки $e_{M2} = \left| M \frac{di_1}{dt} \right|$.

Коэффициент M называют взаимной индуктивностью контуров (катушек). Он имеет ту же размерность, что и индуктивность L и измеряется в генри (Гн). Взаимная индуктивность M зависит только от взаимного расположения катушек, числа витков, геометрических размеров катушек и от магнитных свойств среды.

При любой форме и любом расположении магнитно-связанных катушек взаимную индуктивность M между ними можно определить опытным путем.

Первый способ. Соберем электрическую цепь согласно схеме, изображенной на рис. 6.3. Напряжение, которое появится на зажимах второй катушки, вызвано ЭДС взаимной индукции. Мгновенное значение напряжения $u_2 = M \frac{di_1}{dt}$. Его действующее значение $U_2 = \omega M I_1$. Следовательно: $M = \frac{U_2}{\omega I_1}$.

Второй способ определения M использует последовательное соединение магнитно-связанных катушек (рис. 6.4).

При последовательном соединении двух катушек они могут быть включены либо согласно, либо встречно. Согласно включению соответствует согласное направление магнитных потоков самоиндукции и взаимной индукции, встречному включению – встречное направление этих потоков.

При согласном включении приложенное к схеме напряжение

$$\dot{U} = I [R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 + 2M)].$$

При встречном включении

$$\dot{U} = I [R_1 + R_2 + j\omega(L_1 + L_2 - 2M)],$$

здесь R_1, R_2 – активные сопротивления катушек;

L_1, L_2 – индуктивности катушек;

M – взаимная индуктивность;

$\omega M = X_M$ – сопротивление взаимной индукции.

$L_1 + L_2 \pm 2M = L_{\text{экв}}$ – эквивалентная индуктивность последовательно соединенных магнитно-связанных катушек.

Как видно, полное сопротивление катушек больше при согласном включении. Это может служить признаком для определения одноименных зажимов катушек. Одноименные зажимы (например, начала катушек) на электрических схемах помечают одинаковыми значками, например, звездочками.

Если на электрической схеме токи двух индуктивно связанных катушек одинаково ориентированы относительно одноименных зажимов катушек, например, оба направлены к звездочкам или оба направлены от звездочек, то имеем согласное включение, в противном случае – встречное. Знание одноименных зажимов катушек позволяет определить по электрической схеме вид включения катушек и правильно выбирать знаки (плюс или минус) при составлении уравнений по второму закону Кирхгофа.

Проведем два опыта. В первом из них включим катушки последовательно и согласно, во втором – последовательно и встречно. По результатам измерений найдем:

$$X_{\text{согл}} = \omega(L_1 + L_2 + 2M), \quad X_{\text{встр}} = \omega(L_1 + L_2 - 2M).$$

Разность $X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}} = 4\omega M$, следовательно,

$$M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega}.$$

Степень индуктивной связи между катушками характеризуется коэффициентом связи:

$$K = \frac{M}{L_1 L_2}.$$

Коэффициент связи всегда меньше единицы.

3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования служат две магнитно-связанные катушки, зажимы которых 1–2 и 3–4 выведены на панель стенда.

Для измерения величин, предусмотренных рабочим заданием, на стенде имеются один фазометр, амперметр с пределом измерения до 2 А, два вольтметра (один с диапазоном измерения до 250 В предназначен для измерения напряжения источника питания и второй – многопредельный).

Исследуемая цепь подключается к лабораторному автотрансформатору, позволяющему регулировать напряжение.

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь согласно схеме, изображенной на рис. 6.3, для определения параметров катушек.

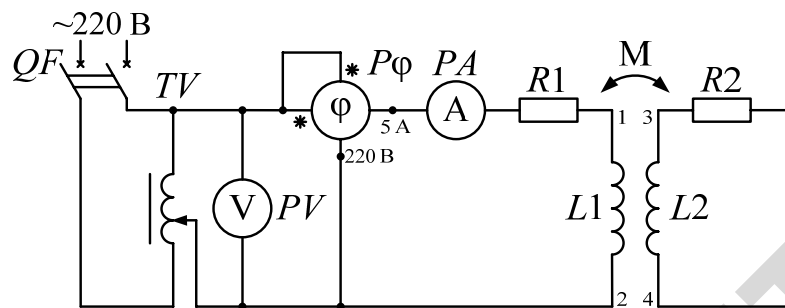


Рис. 6.3. Определение параметров индуктивных катушек

Установить ток в цепи 2 А. После измерения отключить элементы цепи R1, L1 и на их место присоединить R2, L2. Результаты измерений внести в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Параметры индуктивных катушек

Индуктивная катушка	Измерено			Вычислено			
	U	I	cosφ	Z	R	X _L	L
1							
2							

4.2. По результатам измерений определить параметры каждой катушки: полное сопротивление $Z = \frac{U}{I}$, активное сопротивление

$R = Z \cos \varphi$, реактивное сопротивление $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$, индуктивность $L = \frac{X_L}{\omega}$.

4.3. Определить взаимную индуктивность M магнитно-связанных катушек (рис. 6.2).

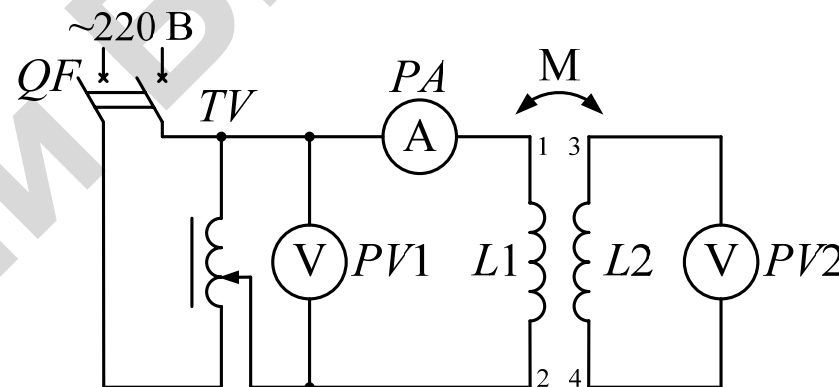


Рис. 6.2. Определение взаимной индуктивности катушек

а) установить ток 2 А, результаты измерений записать в табл. 6.2.

б) отключить цепь и поменять местами катушки: в первичную цепь включить катушку с зажимами 3–4, во вторичную – с зажимами 1–2 и вновь установить ток 2 А. Измерения записать в табл. 6.2.

Таблица 6.2

Взаимная индуктивность и коэффициент связи магнитно-связанных катушек

Измерено			Вычислено	Измерено			Вычислено	
U ₁₂ , В	U ₃₄ , В	I, А	M = $\frac{U_{34}}{\omega I}$, Гн	U ₃₄ , В	U ₁₂ , В	I, А	M = $\frac{U_{12}}{\omega I}$, Гн	K = $\frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$

4.4. По результатам измерений определить взаимную индуктивность M . Убедиться, что взаимная индуктивность одинакова для обоих опытов. Рассчитать коэффициент связи K .

4.5. Определить одноименные зажимы, эквивалентную индуктивность и взаимную индуктивность катушек при их последовательном соединении (рис. 6.4).

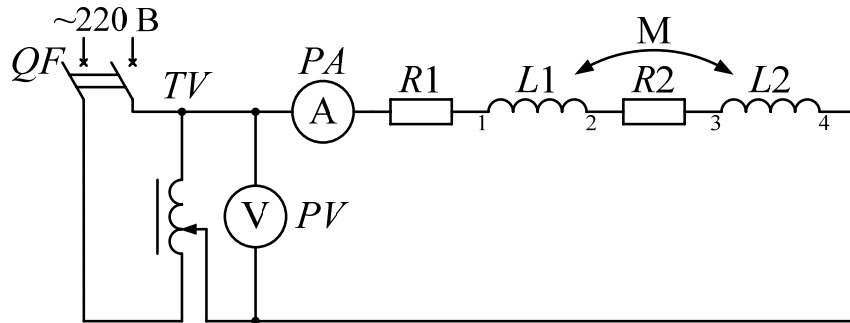


Рис. 6.4. Последовательное соединение индуктивно-связанных катушек

Установить ток 1 А. Данные измерений занести в табл. 6.3.

Отключить цепь, изменить порядок подключения зажимов второй катушки. Установить ток 1 А, данные измерений занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

Номер опыта	Измерено		Вычислено				Включение катушек
	U , В	I , А	R , Ом	Z , Ом	X , Ом	$L_{\text{экв}}$, Гн	
1							
2							

4.6. По данным табл. 6.3 определить в каком из опытов было согласное включение и в каком встречное, на схеме (рис. 6.4) отметить одноименные зажимы катушек звездочками.

4.7. Вычислить эквивалентную индуктивность последовательно соединенных катушек, для чего определить полное сопротивление

$Z = \frac{U}{I}$, активное сопротивление $R = R_1 + R_2$ (значения R_1 и R_2 взять из табл. 6.1), реактивное сопротивление $X = \sqrt{Z^2 - R^2}$ и эквивалентную индуктивность $L_{\text{экв}} = \frac{X}{\omega}$.

4.8. Вычислить значение M по данным согласного и встречного включений.

$$M = \frac{X_{\text{согл}} - X_{\text{встр}}}{4\omega}$$

4.9. Рассчитать сопротивление взаимной индукции $X_M = \omega M$.

4.10. Построить векторные диаграммы для согласного и встречного включения, пользуясь рассчитанными параметрами катушек.

6. Методические указания к обработке результатов эксперимента

При выполнении п. 4.10 программы работы за основной вектор рекомендуется принять вектор тока $I = 1$ А и направить его по действительной оси на комплексной плоскости. Для векторов напряжений рекомендуется масштаб $m_u = 20$ В/см. Векторы напряжений $R_1 \dot{I}$ и $R_2 \dot{I}$ совпадают по направлению с вектором тока \dot{I} . Векторы $jX_{L1} \dot{I}$ и $jX_{L2} \dot{I}$ опережают вектор тока на 90° , а вектор $\pm jX_M \dot{I}$ опережает на 90° при согласном включении и отстает на 90° от вектора тока при встречном включении катушек. Вектор напряжения \dot{U} на входе цепи получаем в результате сложения векторов в соответствии с уравнением

$$\dot{U} = R_1 \dot{I} + jX_{L1} \dot{I} \pm jX_M \dot{I} + R_2 \dot{I} + jX_{L2} \dot{I} \pm jX_M \dot{I}$$

6. Контрольные вопросы

1. Дайте определение явления взаимной индукции.
2. Запишите выражение ЭДС взаимной индукции.
3. Что такое взаимная индуктивность, от чего она зависит?
4. Назовите известные способы определения взаимной индуктивности двух магнитно-связанных катушек.
5. Что означает согласное и встречное включение катушек?
6. Какие зажимы магнитно-связанных катушек называются одноименными?
7. Как определяют вид включения катушек (согласное или встречное) по электрической схеме?

Лабораторная работа № 7

ЛИНИЯ ЭЛЕКТРОПЕРЕДАЧИ ПЕРЕМЕННОГО ТОКА

1. Цель работы

Исследование линии электропередачи переменного тока при различном характере нагрузки.

2. Общие сведения

Линия электропередачи переменного тока обладает активным и реактивным сопротивлениями. Активное сопротивление есть сопротивление прямого и обратного металлических проводов. Реактивное сопротивление создается как индуктивным сопротивлением, определяемым наличием магнитного поля вокруг проводов, так и емкостным сопротивлением, определяемым наличием электрического поля между проводами, два провода являются обкладками конденсатора. Кроме того, сопротивление изоляции проводов хотя и велико, но оно конечно, поэтому через изоляцию проходит небольшой ток утечки. Таким образом, между проводами проходят емкостный ток и ток утечки. Оба этих тока не зависят от того, включен приемник или нет.

В воздушных линиях с напряжением ниже 110 кВ емкостным током линии и током утечки через изоляцию пренебрегают в силу их незначительности. Это позволяет представить линию электропередачи схемой замещения в виде последовательного соединения резистивного $R_{\text{л}}$ и индуктивного $X_{\text{л}}$ элементов (рис. 7.1, а).

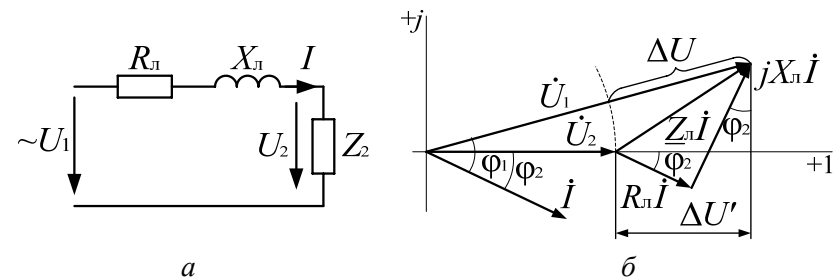


Рис. 7.1. Схема линии электропередач (а), векторная диаграмма (б)

Для электрической цепи (рис. 7.1, а) уравнение по второму закону Кирхгофа имеет вид

$$\dot{U}_1 = (R_{\text{л}} + jX_{\text{л}})\dot{I} + \dot{U}_2.$$

В соответствии с этим уравнением построим векторную диаграмму. Для определенности положим, что нагрузка имеет индуктивный характер. Вектор напряжения на приемнике \dot{U}_2 расположим по оси действительных чисел (рис. 7.1, б). Ток \dot{I} отстает от него на угол φ_2 в силу индуктивного характера нагрузки. Падение напряжения в активном сопротивлении линии $R_{\text{л}}\dot{I}$ совпадает по фазе с током, падение напряжения в индуктивном сопротивлении линии $jX_{\text{л}}\dot{I}$ опережает ток на 90° . Складывая векторы \dot{U}_2 , $R_{\text{л}}\dot{I}$ и $jX_{\text{л}}\dot{I}$, получим напряжение \dot{U}_1 в начале линии, то есть на источнике.

Из векторной диаграммы видно, что напряжение в конце линии \dot{U}_2 отличается от напряжения в начале линии \dot{U}_1 как по величине, так и по фазе. Это отличие обусловлено падением напряжения в линии.

Под падением напряжения в линии передачи понимают модуль геометрической разности векторов напряжения в начале (\dot{U}_1) и в конце (\dot{U}_2) линии:

$$|\dot{U}_1 - \dot{U}_2| = \sqrt{R_{\text{л}}^2 + X_{\text{л}}^2} \cdot I = Z_{\text{л}} I.$$

На векторной диаграмме падение напряжения в линии равно в масштабе длине вектора $Z_{\text{л}}\dot{I}$.

Поскольку сдвиг фаз между \dot{U}_1 и \dot{U}_2 на работе потребителя не отражается, то при расчете проводов учитывают не падение напряжения, а потерю напряжения в линии.

Потеря напряжения в линии передачи равна разности модулей напряжения в начале и конце линии, то есть $\Delta U = |\dot{U}_1| - |\dot{U}_2|$. Потеря напряжения показывает, на какую величину напряжение в конце линии меньше, чем напряжение в начале линии.

На векторной диаграмме (рис. 7.1, б) потеря напряжения равна

в масштабе длине отрезка ΔU , полученного засечкой радиусом равным длине вектора \dot{U}_2 . Из векторной диаграммы видно, что падение напряжения $Z_{\text{л}}\dot{I}$ больше потери напряжения ΔU .

При емкостном характере нагрузки напряжение в конце линии U_2 может сравняться и даже превысить напряжение в начале линии U_1 .

Потерю напряжения с достаточной для практических целей точностью можно рассчитать по формуле

$$\Delta U' = R_{\text{л}} I \cos \varphi_2 + X_{\text{л}} I \sin \varphi_2,$$

где φ_2 – сдвиг фаз между напряжением и током на приемнике.

На векторной диаграмме (рис. 7.1, б) показан отрезок прямой $\Delta U'$, полученный как сумма проекций векторов $R_{\text{л}}\dot{I}$ и $jX_{\text{л}}\dot{I}$ на горизонтальную ось. Как видно, этот отрезок приближенно равен отрезку ΔU , соответствующему потере напряжения в линии.

Параметры линии $R_{\text{л}}$ и $X_{\text{л}}$ можно рассчитать аналитически, исходя из ее конструкции. В условиях лаборатории $R_{\text{л}}$ и $X_{\text{л}}$ можно найти из опыта короткого замыкания линии. По данным, полученным из этого опыта:

$$Z_{\text{л}} = \frac{U_{1\text{к}}}{I_{\text{к}}}, \quad R_{\text{л}} = Z_{\text{л}} \cos \varphi_2, \quad X_{\text{л}} = \sqrt{Z_{\text{л}}^2 - R_{\text{л}}^2}.$$

3. Описание лабораторной установки

Объектом исследования является модель линии передачи переменного тока (рис. 7.2)

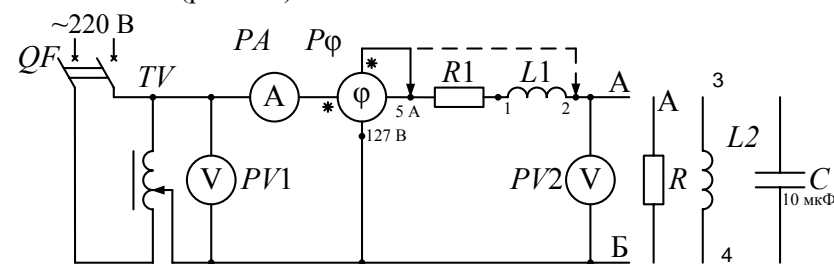


Рис. 7.2. Электрическая модель линии передачи переменного тока

В качестве нагрузки к зажимам АБ подключается фаза А резистивного трехфазного приемника, имеющегося на стенде.

Для создания индуктивного характера нагрузки к резистивному приемнику параллельно включается индуктивная катушка $L2$.

Для создания емкостного характера нагрузки к резистивному приемнику параллельно включается емкость $C = 10$ мкФ.

Для измерения φ_1 и φ_2 в начале и в конце линии входной обмотки напряжения фазометра поочередно присоединяется к зажиму 5 А фазометра и к зажиму 2 индуктивной катушки $L1$.

4. Программа и методика выполнения работы

4.1. Собрать электрическую цепь согласно схеме, изображенной на рис. 7.2.

4.2. Опыт короткого замыкания линии.

Ручку лабораторного автотрансформатора (ТВ) поставить в положение нуля. Зажимы АБ соединить накоротко. Плавно повышая напряжение, установить ток 1 А. Данные измерений занести в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Параметры линии электропередачи

Измерено				Вычислено		
$U_{1к},$ В	$I_k,$ А	$\varphi_1,$ град	$\cos\varphi_1$	$Z_{л},$ Ом	$R_{л},$ Ом	$X_{л},$ Ом

По данным опыта рассчитайте параметры линии передачи.

4.3. Испытание линии передачи при различном характере нагрузки.

Поочередно подключая к зажимам АБ активный, активно-индуктивный и активно-емкостный приемники, установить напряжение источника питания $U_1 = 100$ В и провести необходимые измерения согласно табл. 7.2. Угол φ следует записать с учетом знака.

Взаимная индуктивность и коэффициент связи магнитно-связанных катушек

Приемник	Измерено					Вычислено				
	$I,$ А	$U_1,$ В	$U_2,$ В	$\varphi_1,$ град	$\varphi_2,$ град	$R_{л}I,$ В	$X_{л}I,$ В	$Z_{л}I,$ В	$\Delta U,$ В	$\Delta U',$ В
Активный										
Активно-индуктивный										
Активно-емкостный										

4.4. Постройте в масштабе векторные диаграммы для трех видов нагрузки. Рекомендуемый масштаб напряжения $m_U = 10$ В/см.

5. Контрольные вопросы

1. Что означают потеря и падение напряжения в линии передачи?
2. Как получена формула для приближенного определения потери напряжения ΔU ?
3. При какой нагрузке ΔU и $\Delta U'$ особенно отличаются друг от друга?
4. Какие параметры линии передачи можно определить из опыта короткого замыкания?
5. Как рассчитать мощности источника, приемника и КПД линии передачи?
6. Почему для передачи электрической энергии на дальние расстояния необходимо повышать напряжение?
7. Рассчитайте напряжение источника питания U_1 , если напряжение на приемнике $U_2 = 220$ В, сопротивление приемника $R = 110$ Ом, активное и реактивное сопротивления линии электропередачи $R_{л} = 3$ Ом, $X_{л} = 4$. Определите потерю и падение напряжения в линии электропередачи.

Лабораторная работа № 8

ОПЫТНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТОВ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

1. Цель работы

Определить с помощью опытов холостого хода и короткого замыкания коэффициенты А-формы записи уравнений четырехполюсника.

2. Общие сведения

Четырехполюсником называют электрическую цепь, имеющую два входных и два выходных зажима. Понятием «четыреполюсник» пользуются тогда, когда интересуются токами и напряжением только в двух ветвях, на входе и на выходе четырехполюсника. В качестве четырехполюсника могут быть представлены трансформатор, линия передачи энергии, мостовая схема. Принято изображать четырехполюсник в виде прямоугольника с двумя парами выводов (рис. 8.1).

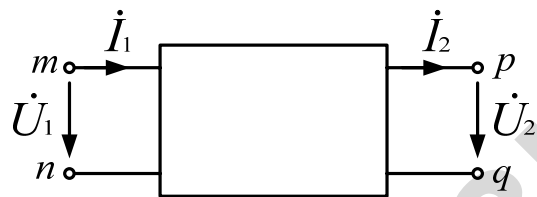


Рис. 8.1. Электрическая схема четырехполюсника

Четырехполюсник является передаточным звеном между источником энергии и приемником. К входным зажимам mn присоединяют источник питания, к выходным pq – приемник. Если внутри четырехполюсника отсутствуют источники энергии, то такой четырехполюсник называется пассивным.

Предполагается, что схема внутренних соединений четырехполюсника и значения сопротивлений в ней остаются неизменными.

Для любого пассивного четырехполюсника напряжение и ток на входе \dot{U}_1 и \dot{I}_1 связаны с напряжением и током на его выходе \dot{U}_2 и \dot{I}_2 линейными зависимостями, которые называются уравнениями четырехполюсника. Уравнения четырехполюсника имеют различную форму записи. Рассмотрим А-форму:

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \underline{A}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{D}\dot{I}_2.\end{aligned}\quad (1)$$

Комплексные коэффициенты \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} в уравнениях (1) зависят от схемы внутренних соединений четырехполюсника, значений сопротивлений и частоты. Коэффициенты связаны между собой соотношением

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1.\quad (2)$$

Если источник питания присоединить к зажимам pq , а приемник к зажимам mn , то уравнения четырехполюсника примут вид

$$\begin{aligned}\dot{U}_1 &= \underline{D}\dot{U}_2 + \underline{B}\dot{I}_2; \\ \dot{I}_1 &= \underline{C}\dot{U}_2 + \underline{A}\dot{I}_2.\end{aligned}\quad (3)$$

Четырехполюсник называется симметричным, если при перемещении местами источника питания и приемника токи в источнике питания и приемнике не изменяются. В симметричном четырехполюснике $\underline{A} = \underline{D}$.

Комплексные коэффициенты \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} можно определить, используя входные сопротивления четырехполюсника, полученные опытным путем. Опытное определение параметров четырехполюсника имеет существенное значение, когда внутреннее строение четырехполюсника неизвестно.

Определим комплексное входное сопротивление четырехполюсника при трех различных режимах его работы.

1. При питании со стороны зажимов mn и разомкнутой ветви pq (холостой ход ветви pq , $I_2 = 0$) из уравнений (1)

$$\underline{Z}_{10} = \frac{\dot{U}_{10}}{\dot{I}_{10}} = Z_{10} e^{j\varphi_{10}} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}. \quad (4)$$

2. При питании со стороны зажимов mn и коротком замыкании ветви pq (короткое замыкание, $U_2 = 0$) из уравнений (1)

$$\underline{Z}_{1k} = \frac{\dot{U}_{1k}}{\dot{I}_{1k}} = Z_{1k} e^{j\varphi_{1k}} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}. \quad (5)$$

3. При питании со стороны зажимов pq и разомкнутой ветви mn (холостой ход ветви mn , $I_2 = 0$) из уравнений (3)

$$\underline{Z}_{20} = Z_{20} e^{j\varphi_{20}} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}. \quad (6)$$

Таким образом, для определения четырех неизвестных коэффициентов \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} располагаем четырьмя уравнениями:

$$\underline{AD} - \underline{BC} = 1; \quad \underline{Z}_{10} = \frac{\underline{A}}{\underline{C}}; \quad \underline{Z}_{1k} = \frac{\underline{B}}{\underline{D}}; \quad \underline{Z} = \frac{\underline{D}}{\underline{C}}.$$

Решая совместно последние уравнения, получим:

$$\underline{A} = \sqrt{\frac{\underline{Z}_{10}^2}{\underline{Z}_{20}(\underline{Z}_{10} - \underline{Z}_{1k})}}; \quad \underline{C} = \frac{\underline{A}}{\underline{Z}_{10}}; \quad \underline{D} = \underline{CZ}_{20}; \quad \underline{B} = \underline{DZ}_{1k}.$$

3. Описание лабораторной установки

В качестве четырехполюсника используются две магнитно-связанные катушки (рис. 8.2).

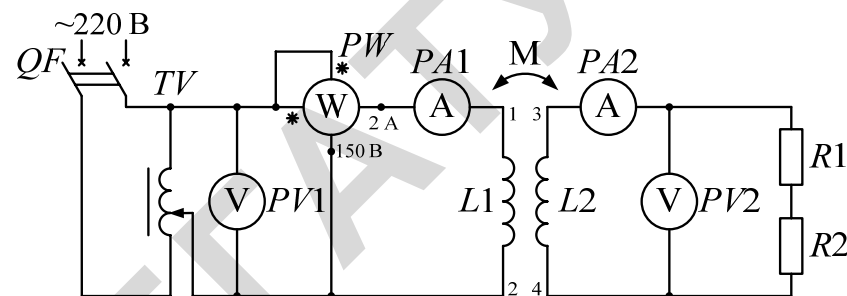


Рис. 8.2. Электрическая схема опытного определения входных сопротивлений четырехполюсника:

PV1 – вольтметр 250 В; PV2 – вольтметр 150 В;
PV1, PV2 – амперметры 2 А; PW – ваттметр 150 В и 2 А

4. Программа и методика выполнения работы

5.1. Рабочий режим четырехполюсника. Собрать электрическую цепь согласно схеме, изображенной на рис. 8.2. Установить на входе напряжение $U_1 = 100$ В, измерить и записать I_1 , P_1 , U_2 , I_2 .

5.2. Опыт холостого хода при питании со стороны первичных зажимов.

Разомкнуть ветвь с резисторами $R1$ и $R2$, установить напряжение $U_{10} = 100$ В, измерить I_{10} , P_{10} .

5.3. Опыт короткого замыкания при питании со стороны первичных зажимов.

Замкнуть зажимы 3, 4 индуктивной катушки $L2$ накоротко, подать такое напряжение на вход цепи, чтобы ток короткого замыкания на входе I_{1k} равнялся току I_1 из пункта 5.1 настоящей работы, измерить U_{1k} , P_{1k} .

5.4. Опыт холостого хода при питании со стороны вторичных зажимов.

Разобрать схему со стороны зажимов 3, 4. Перенести провода с зажимов 1, 2 на зажимы 3, 4. Зажимы 1, 2 оставить разомкнутыми. К зажимам 3, 4 подать напряжение $U'_{10} = 100$ В и измерить I'_{10} , P'_{10} .

5.5. Используя данные пунктов 5.2. и 5.4, определить, является ли данный четырехполюсник симметричным.

5.6. По опытным данным определить комплексные входные сопротивления:

$$\underline{Z}_{10} = Z_{10} e^{j\varphi_{10}}; \quad \underline{Z}_{10} = \frac{U_{10}}{I_{10}}; \quad \varphi_{10} = \arccos \frac{P_{10}}{U_{10} I_{10}};$$

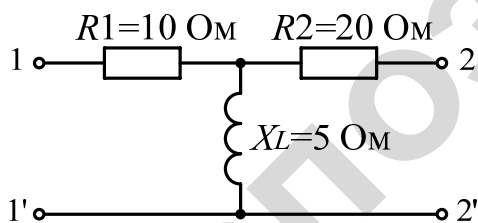
$$\underline{Z}_{1k} = Z_{1k} e^{j\varphi_{1k}}; \quad \underline{Z}_{1k} = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; \quad \varphi_{1k} = \arccos \frac{P_{1k}}{U_{1k} I_{1k}};$$

$$\underline{Z}_{20} = Z_{20} e^{j\varphi_{20}}; \quad \underline{Z}_{20} = \frac{U_{20}}{I_{20}}; \quad \varphi_{20} = \arccos \frac{P_{20}}{U_{20} I_{20}}.$$

5.7. Рассчитать коэффициенты \underline{A} , \underline{B} , \underline{C} , \underline{D} , проверить соотношение $\underline{AD} - \underline{BC} = 1$.

6. Контрольные вопросы

1. Что называют четырехполюсником?
2. Какой четырехполюсник называют активным, а какой пассивным?
3. Какой четырехполюсник называют симметричным?
4. Запишите уравнения четырехполюсника А-формы.
5. На основании каких опытов могут быть составлены уравнения для расчета постоянных коэффициентов четырехполюсника?
6. Как определяется комплексное входное сопротивление четырехполюсника?
7. Запишите выражения для определения у заданного четырехполюсника входных сопротивлений \underline{Z}_{1k} , \underline{Z}_{10} , \underline{Z}_{2k} , \underline{Z}_{20} .



Лабораторная работа № 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ИНДУКТИВНОЙ КАТУШКИ С ФЕРРОМАГНИТНЫМ СЕРДЕЧНИКОМ

1. Цель работы

Исследование параметров и характеристик индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником.

2. Общие сведения

Уравнение электрической цепи, содержащей индуктивную катушку с ферромагнитным сердечником, имеет 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;

L_S – индуктивность рассеяния;

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

в витках катушки основным магнитным потоком Φ_0 и магнитным потоком рассеяния Φ_S (рис. 9.1).

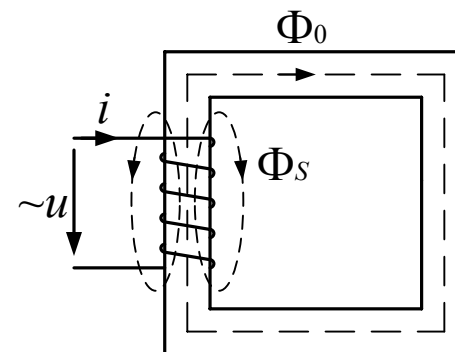


Рис. 9.1. Магнитные потоки катушки с ферромагнитным сердечником

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 ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м). В отличие от ψ_S , потокосцепление ψ_0 нелинейно зависит от тока i .

Заменяя несинусоидальный ток, поток и напряжение u_0 эквивалентными синусоидами, получим:

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

Этому уравнению соответствует векторная диаграмма, изображенная на рис. 9.2, а. Так как в сердечнике катушки имеются потери энергии из-за его перемагничивания и наличия вихревых токов, то угол φ_0 между векторами \dot{U}_0 и \dot{i} меньше, чем $\pi/2$. Разложив напряжение \dot{U}_0 на активную \dot{U}_{0a} и реактивную \dot{U}_{0p} составляющие, получим:

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

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

X_0 – реактивное сопротивление, обусловленное наличием основного магнитного потока;

X_S – реактивное сопротивление, обусловленное потоком рассеяния.

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

Схема замещения катушки, соответствующая полученному урав-

нению, представлена на рис. 9.2, б. Схемы замещения широко используются при расчете электрических цепей, содержащих катушки с ферромагнитными сердечниками (например, трансформаторы или электрические двигатели переменного тока).

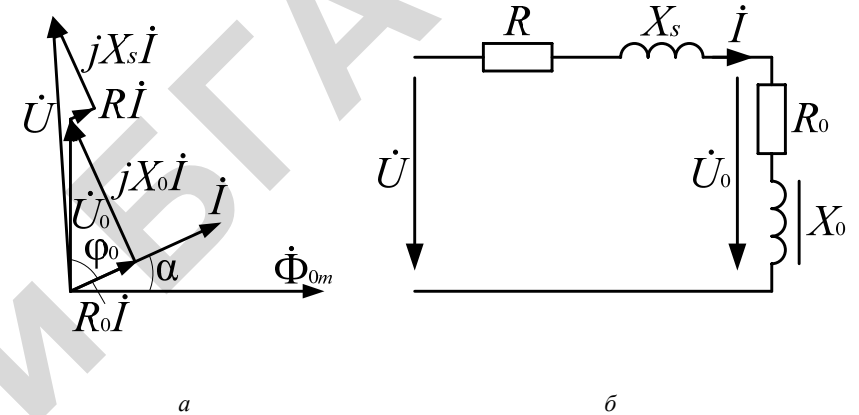


Рис. 9.2. Векторная диаграмма и схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником с последовательным соединением элементов

Если ток разложить на активную \dot{I}_a и реактивную \dot{I}_p составляющие (рис. 9.3, а), то схема замещения катушки в этом случае приобретает вид, представленный на рис. 9.3, 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 .

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

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

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

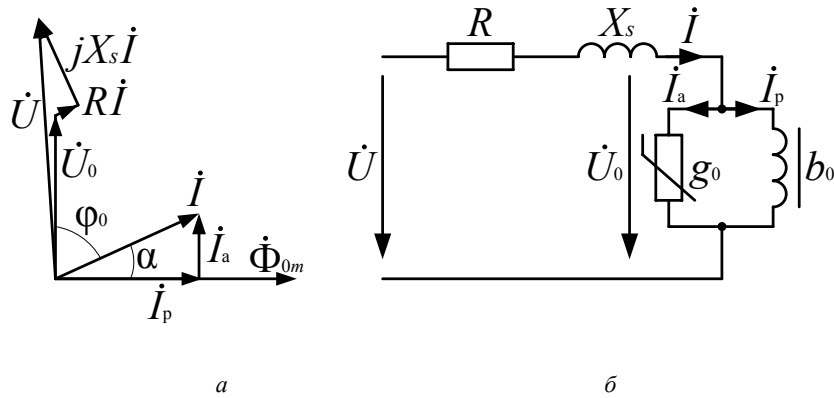


Рис. 9.3. Векторная диаграмма и схема замещения катушки с ферромагнитным сердечником:
 g_0 – активная проводимость; b_0 – реактивная проводимость

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. 9.4, 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.

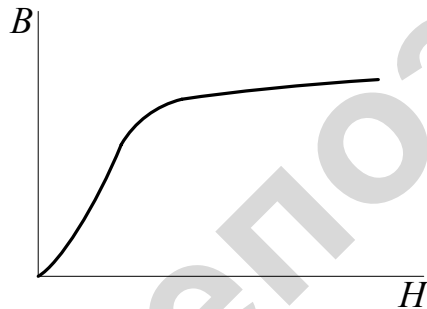


Рис. 9.4. Кривая намагничивания стали

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

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

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

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

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 Iw 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.

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. 9.5, а) и катушка с разъемным ферромагнитным сердечником (рис. 9.5, б). Регулирование воздушного зазора разъемного сердечника производится с помощью прокладок из гетинакса, устанавливаемых под обоими концами съемной части магнитопровода.

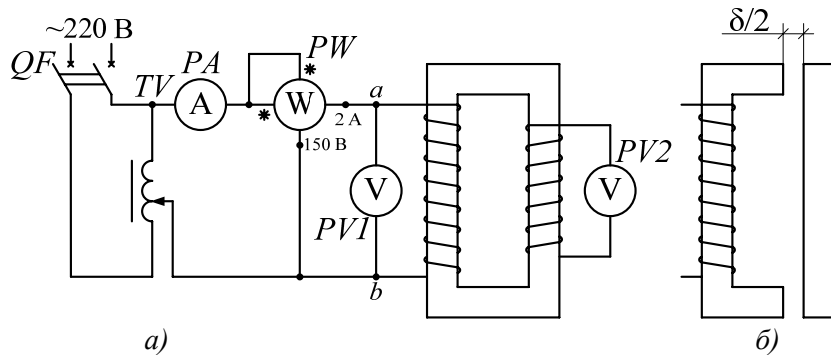


Рис. 9.5. Схема электрической цепи для исследования катушки с ферромагнитным сердечником:
 PA – амперметр 2 А; PW – ваттметр; PV1 – вольтметр 250 В;
 PV2 – вольтметр 50 В

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.
 Собрать цепь согласно схеме, изображенной на рис. 9.5, 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. 9.1.

Таблица 9.1

Вольт-амперная характеристика и параметры катушки с замкнутым ферромагнитным сердечником

Измерено			Вычислено			
U , В	I , А	P , Вт	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , Ом	L_{Σ} , Гн

Определить параметры схемы замещения индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником, для чего установить напряжение $U = 100$ В и произвести измерения согласно табл. 9.2.

Таблица 9.2

Параметры схемы замещения катушки с замкнутым ферромагнитным сердечником

Измерено				Вычислено										
U , В	I , А	P , Вт	U_1 , В	U_0 , В	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , 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 схемы электрической цепи, изображенной на рис. 9.5, а, катушку с разомкнутым сердечником (рис. 9.5, б).

Поддерживая напряжение на входе равным 70 В и последовательно увеличивая с помощью прокладок величины зазоров от 0 до 30 мм, произвести измерения и данные занести в табл. 9.3.

Таблица 9.3

Влияние величины воздушного зазора в сердечнике на параметры катушки

Измерено				Вычислено			
δ , мм	U , В	I , А	P , Вт	Z_{Σ} , Ом	R_{Σ} , Ом	X_{Σ} , Ом	L_{Σ} , Гн

4.3. По результатам измерений вычислить величины, указанные в табл. 9.1, 9.2, 9.3.

4.4. По данным табл. 9.1 построить на одном рисунке кривые $U(I)$, $Z_3(I)$, $R_3(I)$, $X_3(I)$.

4.5. По данным табл. 9.2 построить в масштабе векторную диаграмму индуктивной катушки с ферромагнитным сердечником, разложив ток на активную и реактивную составляющие. Рекомендуемый масштаб $m_u = 10$ В/см.

4.6. По данным табл. 9.3 построить на одном рисунке зависимости $I(\delta)$, $Z_3(\delta)$, $R_3(\delta)$, $X_3(\delta)$.

5. Методические указания к обработке результатов эксперимента

Эквивалентные параметры катушки Z_3 , R_3 и X_3 определяются исходя из предположения, что кривые тока и напряжения заменены эквивалентными синусоидами, действующие значения которых измеряются приборами, указанными в схеме.

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

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 $w = 150$; $w_1 = 28$.

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

Угол φ_0 определяется из выражения

$$P_c = U_0 I \cos \varphi_0; \quad P_c = P - P_m = P - RI^2,$$

где P_m – потери энергии в активном сопротивлении обмотки.

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

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. Виды потерь энергии в сердечнике, от каких величин они зависят?
6. Где находит применение катушка с ферромагнитным сердечником?

Лабораторная работа № 10

ФЕРРОРЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ

1. Цель работы

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. 10.1), то в цепи возможен феррорезонанс напряжений.

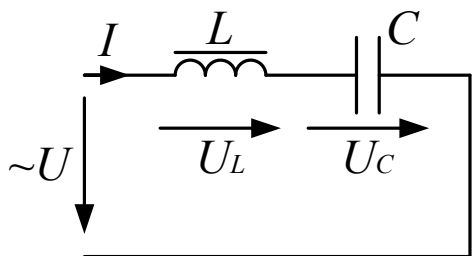


Рис. 10.1. Схема электрической цепи с последовательным соединением нелинейной индуктивной катушки и конденсатора

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 по-

тер 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 \dot{U} , равное векторной сумме напряжений $\dot{U}_L + \dot{U}_C$, 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. 10.2.

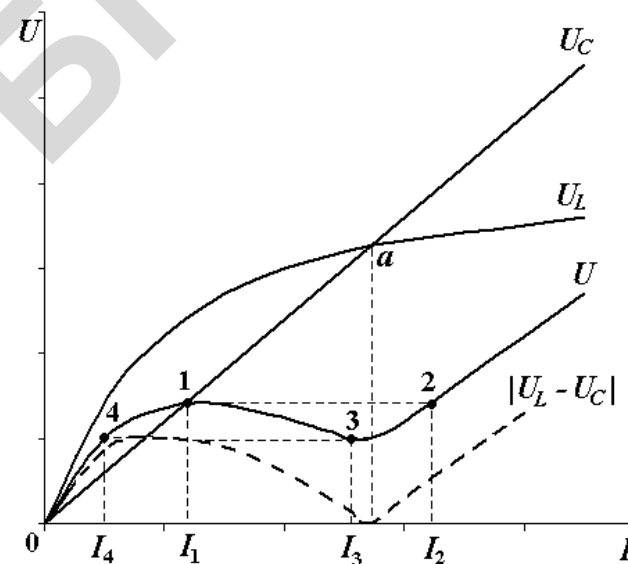


Рис. 10.2. Вольт-амперные характеристики цепи и ее элементов при феррорезонансе напряжений

Из рис. 10.2 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 пара-

метры 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 – емкостный, а в точке 3 он близок к нулю.

3. Описание лабораторной установки

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

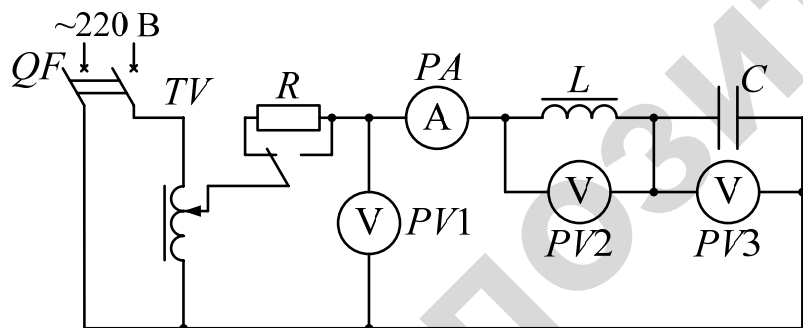


Рис. 10.3. Схема электрической цепи для исследования феррорезонанса напряжений:

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. 10.3.

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. 10.1.

Таблица 10.1

Вольт-амперные характеристики при питании цепи от источника напряжения

Прямой ход				Обратный ход			
I, A	U, B	U_L, B	U_C, B	I, A	U, B	U_L, B	U_C, B

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. 10.2. Всего 8 измерений, среди них должны быть измерения, соответствующие уменьшению напряжения U при увеличении тока и последующему увеличению напряжения U при увеличении тока.

Таблица 10.2

Вольт-амперные характеристики при питании цепи от источника тока

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

4.4. По данным табл. 10.1 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. 10.2 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 № 11

ФЕРРОРЕЗОНАНС ТОКОВ

1. Цель работы

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. 11.1).

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

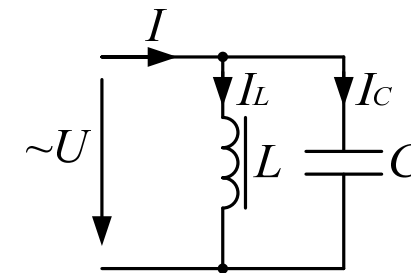


Рис. 11.1. Схема электрической цепи с параллельным соединением нелинейной индуктивной катушки и конденсатора

При анализе явления феррорезонанса в целях 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. 11.2 показаны вольт-амперные характеристики для такой цепи, причем $U(I_L)$ изобразится нелинейной характеристикой, а $U(I_C)$ – прямой, проходящей через начало координат.

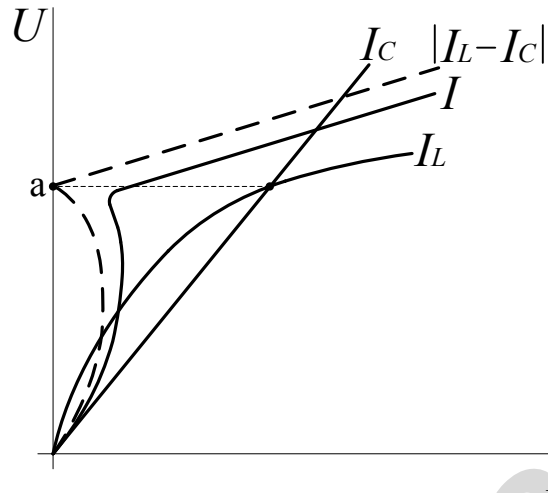


Рис. 11.2. Вольт-амперные характеристики цепи и ее элементов при феррорезонансе токов

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 соотношением

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

где I_C – ток конденсатора, содержащий только первую гармонику.

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:

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

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 № 12

ИССЛЕДОВАНИЕ ОДНОРОДНОЙ ЛИНИИ С РАСПРЕДЕЛЕННЫМИ ПАРАМЕТРАМИ В УСТАНОВИВШЕМСЯ РЕЖИМЕ

1. Цель работы

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

2. Общие сведения

В длинных линиях, представляющих собой цепи с распределенными параметрами, электрическое и магнитное поля 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

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

$$\dot{i} = \frac{\dot{A}_1}{Z_0} e^{-\gamma x} - \frac{\dot{A}_2}{Z_0} e^{\gamma x}, \quad (2)$$

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

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

$\gamma = \sqrt{(R_0 + j\omega L_0)(G_0 + j\omega C_0)}$ – коэффициент распространения;
 X – расстояние от начала линии.

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. 12.1).

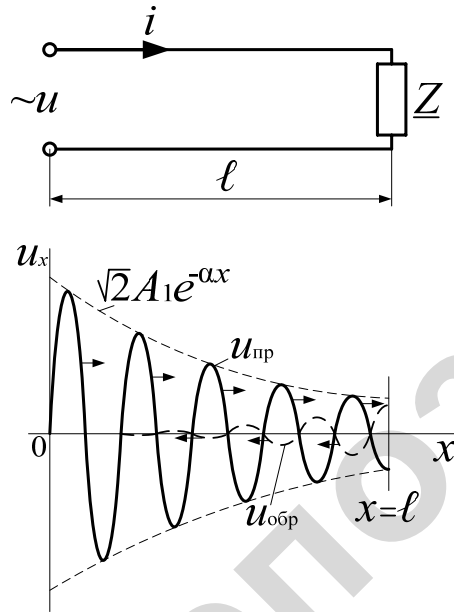


Рис. 12.1. Прямая и обратная волны напряжения

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

Скорость распространения волн в воздушных линиях близка к скорости света.

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

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

Изменение действующего значения напряжения вдоль линий показано на рис. 12.2.

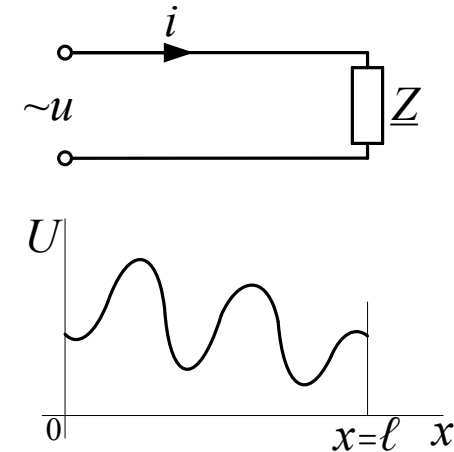


Рис. 12.2. Изменение действующего значения напряжения вдоль линии

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 $\lambda = \frac{U}{f} = \frac{300000}{50} = 6000$ км, а протяженность самих ли-

ний составляет 100–500 км, поэтому здесь такой четкой картины с максимумами и минимумами наблюдаться не будет.

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

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

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

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 чис-

то 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:

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

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

Если сопротивление приемника $\underline{Z} = \infty$ (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) $\dot{I}_2 = 0$ (холостой ход), будем иметь

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

или, переходя к мгновенным значениям,

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

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. 12.3).

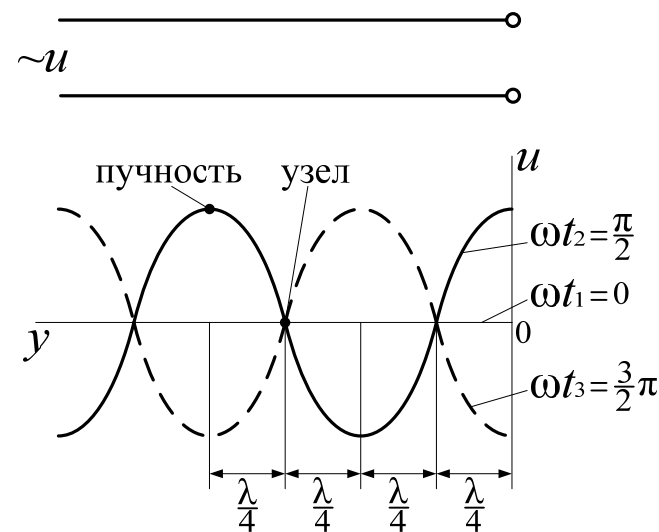


Рис. 12.3. Стоячая волна напряжения

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. 12.4.

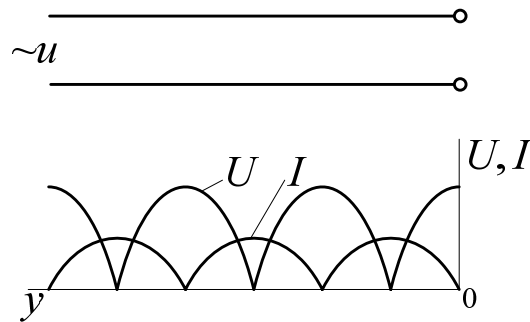


Рис. 12.4. Изменение действующих значений напряжения и тока вдоль линии

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

Аналогично будут стоячие волны, если Z емкостное или индуктивное сопротивление.

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

3. 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 про-

водимостью $\gamma = 5,8 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ и магнитной проницаемостью $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м, имеет активное сопротивление $R_0 = 0,64 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$, индуктивность $L_0 = 16,7 \cdot 10^{-7} \frac{\text{Гн}}{\text{м}}$. Емкость между проводами $C_0 = 0,66 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Ф}}{\text{м}}$. Следовательно, емкостная проводимость и индуктивное сопротивление, приходящиеся на единицу длины линии, соответственно равны $\omega C_0 = 1570 \frac{\text{Ом}}{\text{м}}$.

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

Волновое сопротивление линии приближенно равно

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

4. Программа и методика выполнения работы

1. Включить высокочастотный генератор с подключенной к нему двухпроводной линией (рис. 12.5).

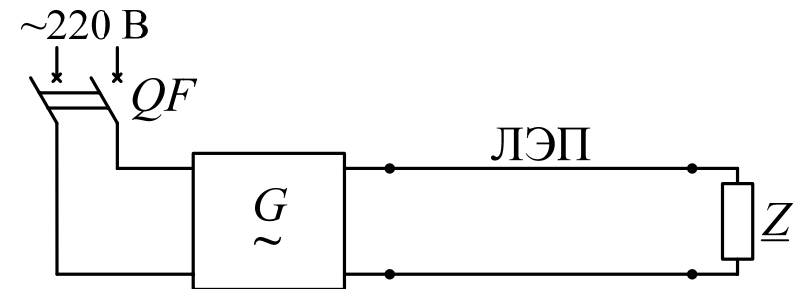


Рис. 12.5. Электрическая схема линии без потерь: G – генератор высокой частоты; ЛЭП – линия электропередачи

Распределение напряжения вдоль линии при $Z = \infty$
(аналогично при $Z = 0, Z = X_C, Z = X_L, Z = R < Z_C, Z = R > Z_C, Z = Z_C$)

$U, В$					
$y, см$					

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

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

5. 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?

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

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_{cp} – среднее расстояние между минимумами;

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

ПРИМЕЧАНИЕ. 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. Произвести измерение распределения напряжения вдоль линии $U = f(y)$ для следующих режимов линии (y – расстояние от конца 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 ($Z = R > Z_C$).

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

На каждый режим производить не менее 10 измерений.

Данные измерений занести в таблицы, аналогичные табл. 12.1.

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 $R = Z_C$?

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Основная

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

Дополнительная

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

Технические нормативные правовые акты

8. ГОСТ 19880-74. Электротехника. Основные понятия. Термины и определения. – Введ. 1975-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 32 с.

9. ГОСТ 1494-77. Электротехника. Буквенные обозначения основных величин. – Взамен ГОСТ 1994-61; введ. 1978-01-07. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 36 с.

10. ГОСТ 2.710-81. ЕСКД. Обозначения буквенно-цифровые в электрических схемах. – Взамен ГОСТ 2.710-75; введ. 1981-01-07. – Москва : Издательство стандартов, 1987. – 15 с.

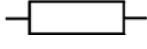
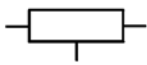
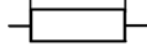
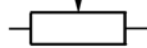
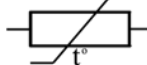
11. ГОСТ 2.723-68. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Катушка индуктивности, дроссели, трансформаторы, автотрансформаторы и магнитные усилители. – Введ. 1971-01-01. – Москва : Издательство стандартов, 1973. – 15 с.

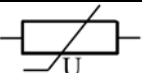






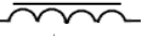



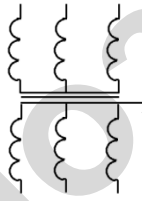
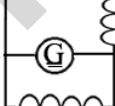
12. ГОСТ 2.728-74. ЕСКД. Обозначения условные графические в схемах. Резисторы, конденсаторы. – Взамен ГОСТ 2.728-68, ГОСТ 2.729-68 в части п. 12, ГОСТ 2.747-68 в части подп. 24, 25 таблицы. [переизд. май 2002 г. с изменен. № 1, 2, утв. в августе 1980 г., июле 1991 г.]; введ. 1975-07-01. – Москва : ИПК Изд-во стандартов, 2002. – 12 с.


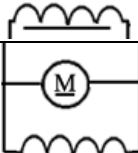










13. ГОСТ 2.755-87. ЕСКД. Обозначения условные графические в электрических схемах. Устройства коммутационные и контактные соединения. – Взамен ГОСТ 2.738-68; ГОСТ 2.755-74; введ. 1988-01-01. – Москва : Изд-во стандартов, 1988. – 21 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

ГРАФИЧЕСКИЕ И БУКВЕННЫЕ УСЛОВНЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СХЕМАХ

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

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

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

Учебное издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ. ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ

Учебно-методическое пособие

В трех частях

Часть 2

Электрические цепи однофазного синусоидального тока

Составители:

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

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

Подписано в печать 16.07.2015 г. Формат 60×84¹/₁₆.
Бумага офсетная. Ризография.
Усл. печ. л. 5,81. Уч.-изд. л. 4,54. Тираж 80 экз. Заказ 530.

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.

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

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