

Утверждаю
Зам. директора ЭЛТИ по УР

И.В. Плотникова

“ _____ ” _____ 2004 г.

РУКОВОДСТВО
К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ
ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ОСНОВАМ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ
В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ
ELECTRONICS WORKBENCH

ЧАСТЬ 1

Методические указания для студентов ЭЛТИ, ИДО, ИЭФ, ЭФФ, ФТФ.

Томск 2004

УДК 621.3.01(075.8)
УДК 621.3.011.1

Руководство к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники в программной среде Electronics Workbench, часть 1. Методические указания для студентов ЭЛТИ, ИДО, ИЭФ, ЭФФ, ФТФ. – Томск: Изд-во ТПУ, 2004. – 56 с.

Составители: доц., канд. техн. наук
доц., канд. техн. наук

С.В. Пустынников,
В.Д. Эськов

Рецензент доц., канд. техн. наук

А.В. Лукутин

Методические указания рассмотрены и рекомендованы к изданию методическим семинаром кафедры ТОЭ
“ _____ ” _____ 2003г.

Зав. кафедрой
доц., канд. техн. наук

Г.В. Носов

Одобрено учебно-методической комиссией ЭЛТИ.
Председатель учебно-методической комиссии

В.И. Готман

ВВЕДЕНИЕ

Руководство предназначено для студентов всех направлений и специальностей электротехнического института, электротехнических специальностей физико-технического, инженерно-экономического и заочного факультетов Томского политехнического университета, учебные планы которых включают дисциплину «Теоретические основы электротехники» (ТОЭ). Оно может быть полезно студентам электрофизического факультета и факультета автоматики и вычислительной техники, изучающих курс «Электротехника» или «Общая электротехника», а также студентам института дистанционного обучения, которые изучают вышеназванные курсы в условиях отсутствия экспериментальной лабораторной базы.

Данное руководство написано на базе «Руководства к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники», часть 1 [3], которое разработано на кафедре ТОЭ ТПУ и посвящено исследованию установившихся режимов линейных электрических цепей с сосредоточенными параметрами на их физических моделях. В нем содержатся методические указания по моделированию физических лабораторных работ в программной среде **Electronics Workbench** (далее **EWB**). При этом полностью сохраняются как содержание лабораторных работ, так и способы достижения поставленных целей. И хотя программа работы может несколько отличаться в силу специфики проведения вычислительных экспериментов в среде **EWB**, по возможности используются те же схемы электрических цепей, те же расчетные формулы и таблицы.

Параметры схем обычно выбираются в соответствии с номером шифра расчетно-графических работ для студентов дневного отделения или с номером шифра контрольных работ для студентов-заочников (последней цифре шифра соответствует номер столбца таблицы вариантов параметров). Если одной из целей работы является обучение студента экспериментальному определению параметров конкретных двухполюсников или четырехполюсников, то предусматривается включение в схему соответствующих блоков, которые могут быть вызваны по известному паролю из файла, указанного в программе работы.

Прежде, чем приступить к работе, студент должен изучить соответствующий теоретический материал по учебнику, рекомендованному преподавателем [1,2], а также раздел «Пояснения к работе», чтобы ответить на вопросы в разделе «Подготовка к работе». Разумеется, необходимо иметь определенные навыки работы в

3

программной среде **EWB**. Для этого с помощью компьютера следует изучить ее особенности, например, по практикуму на Electronics Workbench под ред. П. И. Панфилова [4]. Некоторые из этих особенностей, наиболее часто встречающиеся при выполнении лабораторных работ, и рекомендации по сборке схем лабораторных работ по теоретическим основам электротехники описаны ниже.

Краткая инструкция по сборке схем.

Экспериментальное исследование электрических цепей с помощью программы **EWB** подобно исследованию их физических моделей на лабораторном столе. Роль последнего играет рабочее поле в окне программы **EWB**. Вычислительный эксперимент, как и реальный, проводится с обычной последовательностью операций: сборка схемы электрической цепи, установка параметров ее пассивных и активных элементов, подключение измерительных приборов и их настройка, запуск моделирования. Результаты измерений считываются с панелей приборов: амперметра, вольтметра, ваттметра, фазометра или в виде осциллограмм.

Рабочее окно программы **EWB** версий 5.0 и выше начинается с командной строки, содержащей разделы **File** (работа с файлами), **Edit** (редактирование схемы), **Circuit** (преобразование и оформление схемы), **Analysis** (параметры моделирования), **Window** (упорядочивание информации в окне программы), **Help** (сведения о программе, командах и компонентах). Средняя строка окна дублирует основные команды первой строки (на ее кнопках изображены вполне понятные символы - пиктограммы). Нижняя строка меню представляет собой библиотеку компонентов электрических цепей и содержит, в частности, разделы, широко используемые при сборке схем лабораторных работ по ТОЭ. Ниже они перечисляются слева направо.

1. Поле вспомогательных компонентов **Favorites** находится у левого края нижней строки и предназначено для хранения блоков (подсхем), являющихся частью общей схемы. В первую очередь это двухполюсники и четырехполюсники, параметры которых подлежат определению в данной лабораторной работе.

Для извлечения блока нужно открыть раздел (один щелчок левой кнопкой мыши, когда курсор находится на пиктограмме раздела). При этом выпадает меню подсхем **Subcircuit**. Затем следует установить курсор на изображение нужного блока, нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, вывести блок на рабочее

4

поле. Точно также извлекаются и другие компоненты из соответствующих полей.

В нескольких работах используется блок **wattmeter**, который предназначен для измерения активной мощности в цепях синусоидального тока. К выходным клеммам блока подключается вольтметр, показания которого в вольтах равны активной мощности цепи в ваттах. *Для правильного измерения активной мощности этот вольтметр должен работать в режиме DC.*

2. Поле источников сигналов **Sources** включает как идеальные источники постоянных и синусоидальных напряжений и токов, так и некоторые специальные источники. Сюда же помещен и компонент «заземление» (левая верхняя пиктограмма в выпадающем меню). За ней (по порядку слева направо) следуют пиктограммы независимых источников постоянного напряжения и тока, а затем источников синусоидальных напряжения и тока. В лабораторных работах по первой части курса ТОЭ используются источники напряжения (ЭДС).
3. Поле основных пассивных компонентов **Basic** содержит резисторы, конденсаторы, катушки индуктивности, трансформаторы и коммутационные устройства (например, ключ, управляемый одной из клавиш), а также соединяющий узел. Для определения их параметров нужно после установки элемента в рабочем поле двойным щелчком левой кнопки мыши открыть диалоговое окно **Component Properties**, в разделе **value** задать нужные параметры и нажатием клавиши **Enter** подтвердить их установку.

В схемах могут быть использованы элементы, параметры которых изменяются ступенчатым образом (например, реостат). Среди его характеристик указывается не только наибольшее значение сопротивления, но и величина однократного изменения в процентах от этого максимума, а также управляющая клавиша **R**, нажатие на которую вызывает увеличение сопротивления. Для уменьшения сопротивления требуется одновременное нажатие клавиш **Shift+R**.

Операция поворота выбранного элемента на угол 90° выполняется по команде **Rotate** из меню **Circuit** или после нажатия клавиш **Ctrl+R**. Удалить элемент с рабочего поля можно по команде **Delete** из меню **Edit** или нажатием одноименной клавиши.

4. Поле **Indicators** (четвертое от правого края строки компонентов схем) наряду с другими индикаторами содержит цифровые

5

амперметр и вольтметр. Для измерения постоянных токов и напряжений необходимо при настройке приборов в разделе **value** в строке **mode** задать режим **DC**, а для измерения действующих значений периодически изменяющихся величин – режим **AC**.

5. Поле контрольно-измерительных приборов (КИП) **Instruments** в числе других приборов содержит осциллограф (**Oscilloscope**) и анализатор частотных характеристик **Bode** лабораторных работах в качестве фазометра, причем он уже настроен на измерение разности фаз сигналов, подаваемых на входы **In** (напряжение на клеммах двухполюсника) и **Out** (напряжение, пропорциональное его току) в пределах от -90° до $+90^\circ$. Правые клеммы обоих входов при этом соединяются с общей точкой **Ground**. Перед каждым измерением угла сдвига фаз необходимо, используя левую кнопку мыши, выключить (**O**) и включить (**I**) схему с помощью переключателя, находящегося в правом верхнем углу экрана (перезапуск моделирования режима). Чтобы можно было прочитать результат измерения, следует двойным щелчком левой кнопкой мыши вывести увеличенное изображение лицевой панели прибора в нижнюю часть экрана. Что касается двухлучевого осциллографа, то он используется лишь в работе 12, где и даны необходимые пояснения по работе с этим прибором.

После размещения компонентов схемы на рабочем поле их нужно соединить между собой проводниками. Для этого необходимо подвести курсор к одному из выводов элемента. После появления на нем большой черной (или красной) точки нажать левую кнопку мыши и, удерживая ее, протянуть провод к клемме другого элемента. При отпуске кнопки провод устанавливается между элементами. Если количество проводников, подключенных к одному из выводов данного элемента больше двух, то следует извлечь из меню **Basic** соединяющий узел и установить его на уже существующий проводник. К такому узлу можно подключить еще два провода.

Запуск и отключение собранной схемы осуществляется кнопкой «**Пуск**» в режимах **[I]** и **[O]** соответственно.

Многие вопросы по использованию **EWB** можно решить при обращении к **Help**.

6

ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНОЙ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы. Проверить выполнение законов Кирхгофа, принципов наложения и взаимности, теорему о линейных соотношениях.

Пояснения к работе

Первый закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма токов в узле равна нулю. С одним знаком учитываются токи, подтекающие к узлу, а с другим – отходящие от него:

$$\sum I = 0.$$

Второй закон Кирхгофа. Алгебраическая сумма падений напряжения в контуре равна алгебраической сумме ЭДС контура (в левой части со знаком «плюс» учитываются падения напряжения на тех элементах, токи в которых совпадают с выбранным направлением обхода контура, в правой – ЭДС тех источников, стрелки которых совпадают с направлением обхода):

$$\sum IR = \sum E.$$

Взаимно независимыми уравнениями являются уравнения для токов всех узлов цепи за исключением одного. Для любой цепи взаимно независимые уравнения для напряжений получаются, если, записав уравнение для любого контура, мысленно разорвать в нем одну ветвь, а следующие уравнения также с разрывом ветви записывать для оставшихся целых контуров до их исчерпания. Уравнения для напряжений всех контуров – ячеек плоской (планарной) цепи кроме внешнего контура взаимно независимы.

Принцип наложения. Ток любой ветви линейной электрической цепи с несколькими источниками может быть представлен в виде алгебраической суммы составляющих от действия каждого источника в отдельности.

Принцип взаимности. Если в пассивной линейной цепи выделить две ветви ab и cd , в одну из них включить ЭДС $E_{ab} = E$, а в другой измерить ток $I_{cd} = I$, затем переставить ту же ЭДС во вторую ветвь ($E_{cd} = E$), а ток измерить в первой, то эти два тока окажутся равными ($I_{ab} = I$).

7

Теорема о линейных соотношениях. Если в линейной электрической цепи изменять какой-либо один параметр (ЭДС, сопротивление или задающий ток источника), то любые две величины (токи или напряжения) окажутся связанными линейным соотношением вида $y = ax + b$.

Теорема компенсации. Любой двухполюсник можно заменить источником ЭДС, равной напряжению на зажимах двухполюсника и имеющей ту же полярность, и при этом токи и напряжения остальной части цепи не изменятся.

Схема электрической цепи

В работе используется двухконтурная схема, показанная на рис. 1.1. Значения ЭДС источников постоянного напряжения и сопротивлений в исходной схеме задаются согласно табл. 1.1 (номер варианта указывает преподаватель). В процессе работы значение E_1 придется изменить в соответствии с программой.

Таблица 1.1

№		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E_1	В	4	6	6	10	12	5	7	9	11	3
E_2	В	9	11	6	4	8	10	12	14	5	7
R_1	Ом	120	100	140	80	160	180	200	220	240	80
R_2	Ом	50	60	80	30	40	50	60	80	100	20
R_3	Ом	80	40	60	100	120	80	120	150	30	50

Положением ключей K_1 , K_2 (на схеме в квадратных скобках указаны их индексы) можно управлять с помощью клавиш **1** и **2** соответственно.

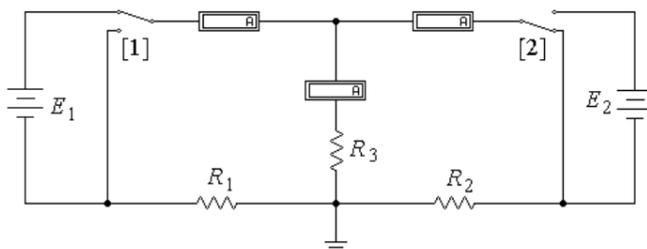


Рис. 1.1

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на вопросы.

1. Как выбирать контуры, чтобы уравнения Кирхгофа для них оказались взаимно независимыми?
2. На рис.1.2 дана структурная схема некоторой цепи (ветви изображены линиями, узлы – точками). Определите для нее число взаимно независимых уравнений, которые можно составить по первому и второму законам Кирхгофа.
3. На рис. 1.3 изображена исследуемая цепь без измерительных приборов и ключей. Запишите для нее необходимое число взаимно независимых уравнений по законам Кирхгофа.
4. Каковы правила знаков при записи уравнений Кирхгофа?
5. В чем сущность принципа наложения и как его проверить на примере цепи рис.1.1?

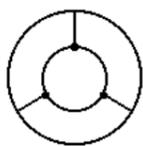


Рис. 1.2

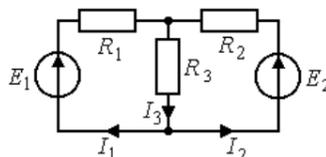


Рис. 1.3

6. Поясните принцип взаимности применительно к цепи рис. 1.3 и выведите формулы для аналитической его проверки (докажите тождество выражений для двух токов).

Программа работы

1. Собрать схему и установить значения ЭДС E_1 , E_2 и сопротивлений R_1 , R_2 , R_3 , выбрав из табл. 1.1 вариант, указанный преподавателем.
2. Экспериментальная проверка законов Кирхгофа и принципа наложения.

Опыт 1. Ключ K_1 установить в верхнее положение, ключ K_2 – в нижнее, как это показано на рисунке. В схеме действует только ЭДС E_1 , вместо E_2 включен проводник с сопротивлением равным нулю («закоротка»).

Опыт 2. Ключ K_2 установить в верхнее положение, ключ K_1 – в нижнее. В схеме действует только ЭДС E_2 , вместо E_1 включена закоротка.

9

Опыт 3. Перевести ключ K_1 в верхнее положение. При этом включены обе ЭДС.

Показания приборов внести в верхние три строки табл. 1.2. В четвертую строку этой таблицы записать сумму показаний приборов в опытах 1 и 2. Сравнить результат с показаниями приборов в опыте 3.

Таблица 1.2

Опыт	ЭДС		Показания приборов			Результаты вычислений		
	E_1	E_2	I_1	I_2	I_3	$\sum IR (1)$	$\sum IR (2)$	$\sum I$
	В	В	мА	мА	мА	В	В	мА
1								
2								
3								
Расчет						Проверка принципа наложения		

Просуммировать значения токов в опытах 1+3 в соответствии с первым законом Кирхгофа. Результаты записать в правый столбец табл. 1.1. Убедиться, что закон выполняется. Подсчитать сумму падений напряжений в левом (1) и правом (2) контурах схемы для всех трех опытов. Результаты внести в табл. 1.2 и сравнить их с соответствующими ЭДС в каждом из опытов.

3. Проверка теоремы о линейных соотношениях при $E_1 = \text{var}$, $E_2 = \text{const}$ для токов I_2 , I_3 и принципа взаимности для токов I_1 , I_2 .

Опыт 4. Изменить значение ЭДС E_1 . Для этого установить курсор на символ этого источника и после двойного щелчка левой клавишей мыши задать величину $E_1 = E_2$. Показания приборов внести в табл. 1.3. Сюда же переписать и результаты опытов 2 и 3 из табл. 1.2.

Таблица 1.3

Номер опыта	U_1	U_2	I_2	I_3	Примечание
	В	В	мА	мА	
4					Коэффициенты зависимости $I_3 = aI_2 + b$ $a =$ $b =$
3					
2					

Опыт 5. Ключ K_2 перевести в нижнее положение. При этом в схеме действует лишь источник ЭДС E_1 с ее новым значением. Показания приборов внести в табл. 1.4. Переписать сюда же показания приборов из опыта 2. Сравнить показания амперметров. Вычислить те

же токи по формулам, выведенным при подготовке к работе (п. 6), и результаты также внести в табл. 1.4.

Таблица 1.4

Опыт	Показания приборов				Расчет	
	U_1	U_2	I_1	I_2	I_1	I_2
	В	В	МА	МА	МА	МА
5	0			–		–
2		0	–		–	

4. Сделать выводы по работе.

РАБОТА 2

ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНОГО ДВУХПОЛЮСНИКА

Цель работы. Проверить возможность замены активного двухполосника эквивалентным генератором и научиться определять параметры эквивалентных схем замещения генератора.

Пояснения к работе

При расчете линейных электрических цепей часто бывает нужно определить ток в какой-нибудь одной ветви. В этом случае по отношению к зажимам этой ветви всю остальную часть цепи можно рассматривать как активный двухполосник (рис. 2.1, а) и при расчете заменить его эквивалентным генератором (рис. 2.1, б) с ЭДС E_{Γ} и внутренним сопротивлением R_{Γ} .

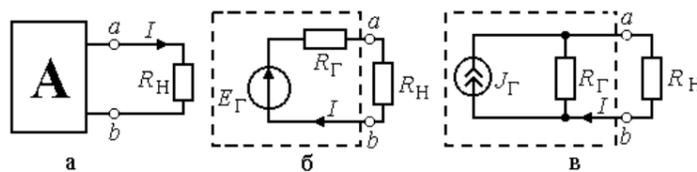


Рис. 2.1

ЭДС эквивалентного генератора равна напряжению между точками присоединения нагрузки ab при ее отключении. Сопротивление эквивалентного генератора равно сопротивлению

11

между теми же точками при равенстве нулю внутренних ЭДС и задающих токов источников двухполосника. Возможна и схема эквивалентного генератора с источником тока (рис. 2.1, в), задающий ток которого равен току короткого замыкания активного двухполосника I_{K3} , при этом $J_{\Gamma} = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma}}$.

Параметры эквивалентного генератора можно определить экспериментально по величине тока и напряжения нагрузки при двух значениях сопротивления приемника (метод двух нагрузок), а также из опытов холостого хода и короткого замыкания.

Параметры генератора по методу двух нагрузок определяются как

$$E_{\Gamma} = \frac{U_2 I_1 - U_1 I_2}{I_1 - I_2}, \quad R_{\Gamma} = \frac{U_2 - U_1}{I_1 - I_2},$$

где U_1 и U_2 – показания вольтметра при первой и второй нагрузках, I_1 и I_2 – показания амперметра при тех же нагрузках.

Параметры генератора из предельных режимов короткого замыкания ($R_H = 0$) и холостого хода ($R_H = \infty$) определяются по формулам:

$$E_{\Gamma} = U_{XX}, \quad R_{\Gamma} = \frac{U_{XX}}{I_{K3}},$$

где U_{XX} – показания вольтметра в режиме холостого хода ($I_H = 0$), I_{K3} – показание амперметра в режиме короткого замыкания ($U_H = 0$).

Для определения тока нагрузки применяются либо формула Тевенена–Гельмгольца (рис. 2.1, б)

$$I = \frac{E_{\Gamma}}{R_{\Gamma} + R_H},$$

либо формула Нортона–Поливанова (рис. 2.1, в)

$$I = \frac{J_{\Gamma}}{1 + R_H / R_{\Gamma}},$$

где $R_H = \frac{U_{ab}}{I}$ – сопротивление нагрузки (рис. 2.2), R_{Γ} – сопротивление генератора, $J_{\Gamma} = I_{K3}$.

Мощность нагрузки и КПД двухполосника определяются по формулам: $P_H = I^2 R_H$ и $\eta = \frac{P_H}{E_{\Gamma} I}$, причем значения их величин зависят от соотношения R_{Γ} и R_H .

Внешняя характеристика $U_{ab} = f(I)$ эквивалентного генератора позволяет графически определить ток нагрузки по известному ее сопротивлению R_H , найдя точку пересечения внешней характеристики генератора и вольтамперной характеристики нагрузки. Последнюю строят по уравнению: $U_H = R_H I$, где $R_H = \text{const}$, задаваясь двумя значениями тока.

Схема электрической цепи

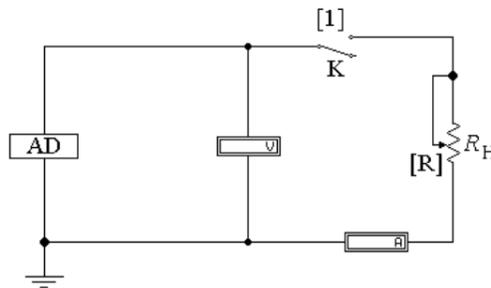


Рис. 2.2

В работе используется схема, показанная на рис. 2.2. Для ее сборки следует открыть файл **LW2** и в качестве активного двухполюсника извлечь из поля вспомогательных компонентов **Favorites** (в верхнем левом углу экрана в начале второй строки меню) подсхему (**Subcircuit**) из набора **AD1 + AD10** (номер варианта указывает преподаватель).

Верхний предел изменения сопротивления нагрузки R_H (1000 Ом), равно как и процентное изменение R_H , следует установить при сборке схемы. В процессе работы для изменения этого сопротивления на заданную (в процентах от наибольшего значения) величину необходимо либо нажать управляющую клавишу **R** (в этом случае сопротивление уменьшается на такую величину), либо одновременно **Shift+R** (тогда сопротивление настолько же увеличивается). Положением ключа К управляет клавиша **1**.

Подготовка к работе

13

1. Сформулируйте теорему об эквивалентном генераторе. Запишите формулы для определения параметров генератора по опыту холостого хода и короткого замыкания.
2. Изобразите одноконтурную схему эквивалентного генератора (рис. 2.1, б) и с ее помощью докажете справедливость формул определения параметров генератора по методу двух нагрузок, используя второй закон Кирхгофа.
3. Определите аналитически, при каком соотношении между сопротивлением нагрузки $R_H = \text{var}$ и внутренним сопротивлением генератора $R_\Gamma = \text{const}$ мощность нагрузки окажется максимальной.
Указание. В максимуме $\frac{\partial P_H}{\partial R_H} = 0$.

Программа работы

1. Открыть файл **LW2** и вызвать подсхему **AD**, номер которой указывает преподаватель. Собрать оставшуюся часть схемы.
1. С помощью управляющей клавиши **1** установить ключ в нижнее положение (ключ разомкнут). Внести показания приборов в табл. 2.1 (режим холостого хода).
2. Перевести ключ в верхнее положение (ключ замкнут) и с помощью управляющей клавиши **R** установить реостат в положение $R_H = 0$ (режим короткого замыкания). Показания приборов записать в ту же таблицу.
3. Исследовать работу активного двухполюсника под нагрузкой (6 опытов). При этом R_H следует устанавливать такой величины, чтобы приращения тока при изменении от 0 до $I_{кз}$ были примерно одинаковыми. Показания приборов также внести в табл. 2.1.
4. Определить параметры эквивалентного генератора E_Γ и R_Γ по данным опытов холостого хода и короткого замыкания.
5. Определить E_Γ и R_Γ по методу двух нагрузок. Для расчета следует выбрать такие два опыта, токи в которых отличались бы друг от друга не менее, чем в 2 раза.
6. Вычислить мощность нагрузки P_H , КПД η и величину $\ln \frac{R_H}{R_\Gamma}$ для всех значений сопротивления R_H . Результаты расчетов по пп. 5, 6, 7 внести в табл. 2.1.

14

Таблица 2.1

Опыт	I	U_{ab}	R_H	E_{Γ}	R_{Γ}	$\ln \frac{R_H}{R_{\Gamma}}$	P_H	η
	мА	В	Ом	В	Ом	–	Вт	%
Холостой ход	0		∞			∞	0	100
1								
2								
...								
6								
Короткое замыкание		0	0			$-\infty$	0	0

7. Определить E_{Γ} и R_{Γ} по методу двух нагрузок. Для расчета следует выбрать такие два опыта, токи в которых отличались бы друг от друга не менее, чем в 2 раза.
8. Вычислить мощность нагрузки P_H , КПД η и величину $\ln \frac{R_H}{R_{\Gamma}}$ для всех значений сопротивления R_H . Результаты расчетов по пп. 5, 6, 7 внести в табл. 2.1.
9. Построение по данным табл. 2.1 внешней характеристики генератора $U_{ab} = f(I)$ и зависимости мощности нагрузки от соотношения сопротивлений $P_H = f(\ln \frac{R_H}{R_{\Gamma}})$. Из последнего графика найти сопротивление R_H , при котором мощность нагрузки максимальна. Сравнить полученное сопротивление с определенным теоретически при подготовке к работе. Построить также зависимость $\eta = f(P_H)$.
10. Сравнить параметры эквивалентного генератора, найденные двумя способами, и значения тока нагрузки, которые определены по двум формулам и по внешней характеристике генератора. Проанализировать зависимости $P_H = f(\frac{R_H}{R_{\Gamma}})$ и $\eta = f(P_H)$.
11. Сделать общие выводы по работе.

15

РАБОТА 3

КОНДЕНСАТОР И КАТУШКА ИНДУКТИВНОСТИ В ЦЕПИ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы. Научиться определять параметры конденсатора и катушки индуктивности с помощью амперметра, вольтметра и фазометра, строить векторные диаграммы, а также проверить выполнение законов Кирхгофа в цепи синусоидального тока.

Пояснения к работе

Реальный конденсатор в отличие от идеального обладает некоторыми тепловыми потерями энергии из-за несовершенства изоляции. В расчетах электрических цепей такой конденсатор представляют обычно параллельной схемой замещения. Параметры этой схемы – g и C – можно экспериментально определить по показаниям амперметра I , вольтметра U и фазометра φ следующим образом. Сначала найти по закону Ома полную проводимость конденсатора $y = \frac{I}{U}$, потом активную $g = y \cos \varphi$ и емкостную

$b_C = -y \sin \varphi$ проводимости, а затем по известной угловой частоте синусоидального напряжения сети ($\omega = 314$ рад/с) подсчитать емкость $C = \frac{b_C}{\omega}$.

При параллельном соединении элементов R , L , C по законам Ома и Кирхгофа в комплексной форме для входного тока имеем:

$$I = I_R + I_L + I_C = U Y,$$

где $Y = g - jb = y e^{-j\varphi}$ – комплексная проводимость; g – активная,

$b = b_L - b_C$ – реактивная, y – полная проводимости; $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$ – угол

сдвига фаз напряжения и тока; $b_L = \frac{1}{\omega L}$ – индуктивная, $b_C = \omega C$ – емкостная проводимости.

Напряжение на конденсаторе отстает по фазе от тока (угол сдвига фаз $\varphi < 0$, $b = -b_C$, так как $b_L = 0$).

16

Угол потерь, характеризующий несовершенную изоляцию конденсатора, равен $\delta = \arctg \frac{g}{\omega C}$; очевидно, $tg \delta = tg(90^\circ + \varphi)$.

Реальная катушка индуктивности также обладает тепловыми потерями в отличие от идеальной катушки. Эквивалентную схему замещения такой катушки обычно представляют в виде последовательного соединения элементов R и L . Эти параметры можно экспериментально определить по показаниям вышеупомянутых приборов, воспользовавшись формулами:

$$z = \frac{U}{I}, \quad R = z \cos \varphi, \quad X = z \sin \varphi, \quad L = \frac{X}{\omega}.$$

При последовательном соединении элементов R, L, C по законам Ома и Кирхгофа в комплексной форме входное напряжение равно:

$$\underline{U} = \underline{U}_R + \underline{U}_L + \underline{U}_C = I \underline{Z},$$

где $Z = R + jX = ze^{j\varphi}$ – комплексное сопротивление; R – активное, $X = X_L - X_C$ – реактивное, z – полное сопротивление; $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$ – угол сдвига фаз напряжения и тока; $X_L = \omega L$ – индуктивное, $X_C = \frac{1}{\omega C}$ – емкостное сопротивления.

Ток в катушке отстает по фазе от напряжения (угол сдвига фаз $\varphi > 0$, $X = X_L$, так как $X_C = 0$). Тангенсом этого угла оценивается добротность катушки: $Q_L = tg \varphi = \frac{X_L}{R}$.

Подготовка к работе

1. Какие физические явления отражают в схеме замещения конденсатора элементы g, C , а в схеме замещения катушки индуктивности – элементы R, L ?
2. Что такое активная, емкостная, индуктивная, реактивная, полная проводимости? Как они связаны между собой?
3. Что такое активное, емкостное, индуктивное, реактивное, полное сопротивления? Как они связаны между собой?
4. В каких пределах может изменяться угол сдвига фаз напряжения и тока на входе пассивного двухполюсника?
5. Записать уравнение первого закона Кирхгофа для схемы рис. 3.1 (ключ K замкнут, $0 < R_1 < \infty$) и уравнение второго закона для

17

схемы рис. 3.2 ($0 < R_1 < \infty$) как для мгновенных, так и для комплексных значений токов и напряжений.

3а. ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНО-ЕМКОСТНОЙ ЦЕПИ

Схема электрической цепи

Схема, показанная на рис. 3.1, питается от источника синусоидального напряжения с частотой 50 Гц и действующим значением напряжения 100 В.

Конденсатор в схеме представлен блоком, который нужно выбрать в поле компонентов из набора **cond1 ÷ cond10** по указанию преподавателя.

Для управления положением ключа служит клавиша **1**. При разомкнутом ключе можно по показаниям приборов определить параметры схемы замещения конденсатора, состоящей из параллельно включенных C и R .

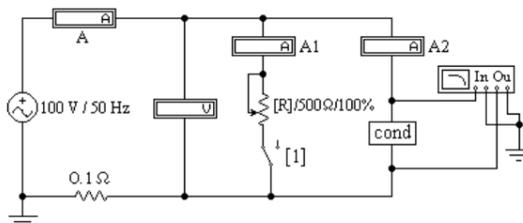


Рис. 3.1

Роль фазометра в схеме исполняет прибор **Bode-Plotter**, пределы измерения которого от -90° до $+90^\circ$ уже установлены. Его нужно извлечь из поля контрольно-измерительных приборов **Instruments** (у правого края второй строки меню). Увеличенное изображение прибора появляется в нижней части рабочего поля после двойного щелчка левой клавишей мыши, когда курсор находится на символе прибора в схеме. При замкнутом ключе угол сдвига фаз можно изменять за счет изменения сопротивления реостата (управляющая клавиша **R**) в пределах от 500 до 50 Ом (следует избегать слишком малых значений этого сопротивления во избежание нарушения работы программы).

Программа работы

18

1. Открыть файл **LW3a** и извлечь из поля компонентов **Favorites** блок **cond**, соответствующий номеру своего варианта. Собрать остальную часть схемы, показанной на рис. 3.1.
2. Ключ с помощью управляющей клавиши **1** установить в правое положение (разомкнуть). Включить кнопку «Пуск» и записать показания приборов в верхнюю строку табл. 3.1.

Таблица 3.1

Данные опыта						Результаты расчета					
U	I	φ	I_1	I_2	C	g	δ	I	I_1	I_2	ΣI
В	А	град	А	А	мкФ	См	град	А	А	А	А
			0					-	0	-	-
					-	-	-				

3. Вычислить параметры конденсатора g , b_C , C , а также угол потерь δ . Записать результаты в ту же строку.
4. Замкнуть ключ и с помощью управляющей клавиши **R** подобрать такое значение сопротивления реостата, чтобы обеспечить заданную преподавателем величину угла сдвига фаз напряжения и тока на входе схемы (в пределах от -15° до -75°). Напомним, что при каждом измерении угла сдвига фаз нужно предварительно выключить и включить кнопку «Пуск». Показания приборов внести в нижнюю строку табл. 3.1.
5. Принять начальную фазу входного напряжения равной нулю и записать комплексные действующие значения токов I , I_1 , и I_2 в этом режиме в ту же строку. Подсчитать $\Sigma I = I_1 + I_2$ и сравнить результат со значением I , полученном в эксперименте, проверив тем самым выполнение первого закона Кирхгофа.
6. По данным табл. 3.1 построить лучевую диаграмму токов.

3б. ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНО-ИНДУКТИВНОЙ ЦЕПИ

Схема электрической цепи

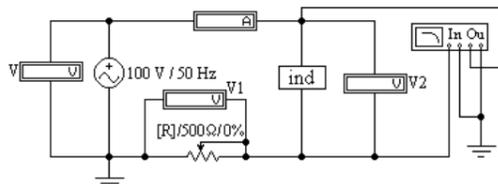


Рис. 3.2

19

Схема, показанная на рис. 3.2, питается от источника синусоидального напряжения с частотой 50 Гц и действующим значением напряжения 100 В. Катушка индуктивности в схеме представлена блоком, который нужно выбрать в поле компонентов **Favorites** из набора **ind1 + ind10** по указанию преподавателя. Когда сопротивление реостата R_1 равно нулю, по показаниям приборов можно вычислить параметры схемы замещения катушки R и L .

Прибор **Bode-Plotter** исполняет и в этой схеме роль фазометра с теми же особенностями измерения угла сдвига фаз напряжения и тока на входе цепи. За счет изменения сопротивления реостата можно добиться изменения угла до значения, указанного преподавателем.

Программа работы

7. Открыть файл **LW3b** и извлечь из поля компонентов **Favorites** подсхему **ind**, соответствующую номеру своего варианта. Собрать остальную часть схемы, показанной на рис. 3.2.
8. Вывести реостат с помощью управляющей клавиши **R** (установить $R = 0$). Включить кнопку «Пуск» и записать показания приборов в верхнюю строку табл. 3.2.

Таблица 3.2

Данные эксперимента						Результаты расчета					
U	I	φ	U_1	U_2	L	R	Q_L	\underline{U}	\underline{U}_1	\underline{U}_2	$\Sigma \underline{U}$
В	А	град	В	В	Гн	Ом	-	В	В	В	В
			0					-	0	-	-
					-	-	-				

9. Вычислить параметры катушки индуктивности R , z , X , L , а также ее добротность Q_L . Записать результаты в ту же строку.
10. С помощью управляющей клавиши **R** подобрать такое значение сопротивления реостата, чтобы обеспечить заданную преподавателем величину угла сдвига фаз напряжения и тока на входе схемы (в пределах от 15° до 75°). Напомним, что при каждом измерении угла сдвига фаз нужно предварительно выключить и включить кнопку «Пуск». Показания приборов внести в нижнюю строку табл. 3.2.
11. Принять в этом режиме начальную фазу входного тока равной нулю и записать комплексные действующие значения напряжений \underline{U} , \underline{U}_1 , и \underline{U}_2 в ту же строку. Подсчитать $\Sigma \underline{U} = \underline{U}_1 + \underline{U}_2$ и сравнить

- результат со значением \underline{U} , полученном в эксперименте, проверив тем самым выполнение второго закона Кирхгофа.
12. По данным второй строки табл. 3.2 построить топографическую диаграмму напряжений.
 13. Сделать общие выводы по работе.

РАБОТА 4

ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЕПЕЙ С ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ

Цель работы. Научиться определять параметры катушек индуктивности с помощью амперметра, вольтметра и ваттметра. Провести экспериментальное исследование цепей с последовательным и параллельным соединением индуктивно связанных катушек. Научиться определять взаимную индуктивность катушек и строить векторные диаграммы для цепей с индуктивной связью.

Пояснения к работе

Реальная катушка индуктивности без ферромагнитного сердечника обычно бывает представлена схемой замещения из последовательно соединенных идеальной индуктивности и активного сопротивления. Параметры этой схемы могут быть определены по показаниям амперметра, вольтметра и ваттметра с помощью формул:

$$R = \frac{P}{I^2}, \quad z = \frac{U}{I}, \quad X = \sqrt{z^2 - R^2}, \quad L = \frac{X}{\omega}$$

При последовательном соединении катушек полное сопротивление цепи находится как

$$z = \sqrt{R_{\Sigma}^2 + X_{\Sigma}^2}, \quad R_{\Sigma} = R_1 + R_2, \quad X_{\Sigma} = X_1 + X_2$$

Если часть Φ_{21} магнитного потока Φ_{11} , созданного током i_1 в одной из катушек с числом витков w_1 , пронизывает другую катушку с числом витков w_2 , или, наоборот, часть Φ_{12} потока второй катушки Φ_{22} , созданного током в ней i_2 , пронизывает первую, то эти частичные потоки называются *потоками взаимной индукции*, а полные потоки (Φ_{11} , Φ_{22}) – *потоками самоиндукции*. Потокосцепления этих потоков с соответствующими катушками равны:

$$\Psi_{11} = w_1 \Phi_{11}, \quad \Psi_{22} = w_2 \Phi_{22}, \quad \Psi_{12} = w_1 \Phi_{12}, \quad \Psi_{21} = w_2 \Phi_{21},$$

21

а собственные и взаимные индуктивности определяются так:

$$L_1 = \frac{\Psi_{11}}{i_1} \Big|_{i_2=0}, \quad M_{21} = \frac{\Psi_{21}}{i_1} \Big|_{i_2=0}, \quad L_2 = \frac{\Psi_{22}}{i_2} \Big|_{i_1=0}, \quad M_{12} = \frac{\Psi_{12}}{i_2} \Big|_{i_1=0}.$$

В линейной цепи справедлив принцип взаимности: $M_{12} = M_{21} = M$.

Направление магнитного потока связано с направлением создающего его тока правилом «буравчика» (правоходового винта). Чтобы учесть ориентацию потоков само- и взаимной индукции в одной катушке, вводится понятие *одноименных зажимов*. Зажимы, принадлежащие разным катушкам, называются *одноименными* и обозначаются на схеме одинаковыми символами (точками, звездочками), если при одинаковой ориентации токов по отношению к этим зажимам потоки само- и взаимной индукции складываются.

Напряжения на индуктивно связанных элементах определяются по закону электромагнитной индукции и их также можно представить в виде суммы составляющих само- и взаимной индукции:

$$u_1 = u_{1L} + u_{1M} = \frac{d\Psi_{11}}{dt} \pm \frac{d\Psi_{12}}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} \pm M \frac{di_2}{dt},$$

$$u_2 = u_{2L} + u_{2M} = \frac{d\Psi_{22}}{dt} \pm \frac{d\Psi_{21}}{dt} = L_2 \frac{di_2}{dt} \pm M \frac{di_1}{dt}.$$

Знак «плюс» в этих выражениях соответствует одинаковой ориентации токов по отношению к одноименным зажимам (*согласное включение*), «минус» – различной (*встречное включение*).

В установившемся синусоидальном режиме действующие значения напряжений само- и взаимной индукции равны:

$$U_{1L} = X_{L1} I_1, \quad U_{1M} = X_M I_2, \quad U_{2L} = X_{L2} I_2, \quad U_{2M} = X_M I_1,$$

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

Наличие индуктивной связи изменяет величину эквивалентного реактивного сопротивления. Для последовательного соединения индуктивно связанных катушек

$$X_{\Sigma}^{cos\varphi} = X_1 + X_2 + 2X_M = \omega(L_1 + L_2 + 2M) = \omega L_{\Sigma}^{cos\varphi}$$

$$X_{\Sigma}^{сстр} = X_1 + X_2 - 2X_M = \omega(L_1 + L_2 - 2M) = \omega L_{\Sigma}^{сстр}$$

Отсюда по данным опытов могут быть найдены сопротивление взаимной индукции X_M и взаимная индуктивность M :

$$X_M = \frac{X_{\mathcal{E}}^{cogl} - X_{\mathcal{E}}^{встр}}{4}, \quad M = \frac{X_M}{\omega}$$

Сравнение величин эквивалентных сопротивлений схем приводит к способу экспериментального определения одноименных зажимов: если при одинаковом напряжении измерить токи при согласном и встречном включении катушек, то ток при встречном включении окажется больше.

Схема электрической цепи

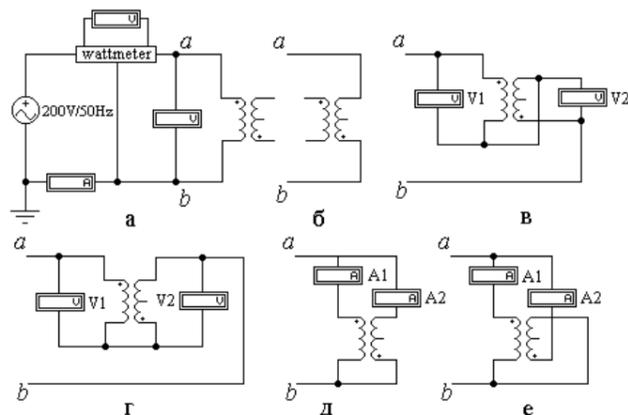


Рис. 4.1

В работе используется электрическая цепь, схема которой показана на рис. 4.1. По ходу работы в схеме изменяется ее правая часть (между точками *a* и *b*). Левая же часть, содержащая источник и приборы, остается неизменной. В их число входит и блок **wattmeter**, который играет роль ваттметра (показания вольтметра, подключенного к его выходным зажимам, в вольтах численно равны активной мощности цепи в ваттах). Напомним, что этот прибор должен работать в режиме **DC**.

В качестве катушек индуктивности используются обмотки линейного трансформатора, параметры которого устанавливаются по указанию преподавателя. Используя показания приборов, с помощью схем рис. 4.1,а и 4.1,б можно определить параметры катушек. А с помощью схем рис. 4.1,в,г и рис. 4.1,д,е – соответственно параметры их

последовательного и параллельного соединения при согласном и встречном включении.

Подготовка к работе

1. Сформулировать закон электромагнитной индукции.
2. Как с помощью амперметра, вольтметра, ваттметра определить параметры катушки Z, R, X, L ?
3. Какое включение катушек индуктивности называется согласным? Встречным?
4. Как по результатам опытов для последовательного соединения индуктивно связанных катушек при неизменном напряжении определить характер их включения (согласное или встречное)? А при неизменном во всех опытах токе?
5. Какие зажимы катушек называются одноименными? Как их определить экспериментально?
6. Как опытным путем определить взаимную индуктивность?

Программа работы

Таблица 4.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
LE (Гн)	0.2	0.25	0.2	0.1	0.15	0.15	0.25	0.05	0.05	0.1
LM (Гн)	0.1	0.05	0.05	0.2	0.15	0.05	0.1	0.15	0.2	0.15
RP (Ом)	20	20	20	20	20	30	20	30	30	30
RS (Ом)	30	40	30	40	40	40	30	20	40	20

1. Открыть файл **LW4** и извлечь из поля вспомогательных компонентов **Favorites** (у левого края нижней строки меню) подсхему (**Subcircuit**) **wattmeter**. Собрать остальную часть схемы, показанной на рис. 4.1,а. После сборки схемы необходимо сделать два щелчка левой кнопкой мыши, когда курсор находится на изображении катушек индуктивности, после чего щелкнуть левой кнопкой на **Edit** и задать их параметры в соответствии с номером своего варианта согласно табл. 4.1.
2. Определение параметров каждой из катушек по методу амперметра, вольтметра и ваттметра. С помощью схемы рис.4.1,а

можно определить параметры первой катушки. А для определения параметров второй катушки нужно подключить ее выводы к зажимам *ab* левой части схемы вместо выводов первой (рис. 4.1,б). Показания приборов и результаты вычисления параметров внести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

№ катушки	Показания приборов			Результаты расчета			
	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>Z</i>	<i>R</i>	<i>X</i>	<i>L</i>
	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	Гн
1							
2							

3. Исследование цепи, состоящей из последовательно соединенных катушек при встречном (рис.4,в) и согласном (рис.4,г) включении. Результаты внести в таблицу 4.3.

Указание. Опыт при отсутствии индуктивной связи не проводится.

4. По данным таблицы 4.2 определить сопротивление взаимной индукции.

5. Построение векторных диаграмм для последовательного соединения катушек при согласном и встречном включении. Расчетные данные для построения диаграмм внести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Включение катушек	Показания приборов			Результаты расчета					
	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>P</i>	<i>U</i> ₁	<i>U</i> ₂	<i>z</i> _∑	<i>R</i> _∑	<i>X</i> _∑	<i>L</i> _∑
	В	А	Вт	В	В	Ом	Ом	Ом	Гн
согласное									
встречное									

Указания.

а) Величины *R*, *X* для каждой из катушек брать из табл.4.2.

- б) Показать на диаграмме напряжения на зажимах каждой из катушек и входное напряжение, определить их величины, внести данные в табл. 4.4 и сравнить с результатами измерений (табл. 4.3).

Таблица 4.4

Включение катушек	Результаты вычислений							Из диаграмм		
	<i>I</i>	<i>IR</i> ₁	<i>IX</i> ₁	<i>IX</i> _М	<i>IR</i> ₂	<i>IX</i> ₂	<i>IX</i> _М	<i>U</i>	<i>U</i> ₁	<i>U</i> ₂
	А	В	В	В	В	В	В	В	В	В
согласное										
встречное										

25

6. Исследование цепи с параллельным соединением катушек при встречном (рис. 4.1,д) и согласном (рис. 4.1,е) включении. Показания приборов внести в табл. 4.5.

Таблица 4.5

Включение катушек	Показания приборов				
	<i>U</i>	<i>I</i>	<i>I</i> ₁	<i>I</i> ₂	<i>P</i>
	В	А	А	А	Вт
согласное					
встречное					

Указание. Опыт при отсутствии индуктивной связи не проводится.

7. Построение топографических диаграмм напряжений и лучевых диаграмм токов для параллельного соединения катушек при согласном и встречном включении. Расчетные данные для построения диаграмм внести в табл. 4.6.

Таблица 4.6

Включение катушек	Из опыта			Результаты расчета					
	<i>I</i> ₁	<i>I</i> ₂	α	$U_{R1} = I_1 R_1$	$U_{X1} = I_1 X_1$	$U_{M1} = I_2 X_M$	$U_{R2} = I_2 R_2$	$U_{X2} = I_2 X_2$	$U_{M2} = I_1 X_M$
	А	А	град	В	В	В	В	В	В
согласное									
встречное									

Указание. Построения следует начинать с лучевой диаграммы токов. При этом, если первым отложить вектор тока в ветви с большим активным сопротивлением, то вектор тока другой ветви должен отставать от него на угол α , который вычисляется по формуле:

$$\alpha = \arctg \frac{X_1 \pm X_M}{R_1} - \arctg \frac{X_2 \pm X_M}{R_2},$$

где знак «минус» для согласного включения; «плюс» – для встречного.

8. Сделать выводы по работе.

26

ИССЛЕДОВАНИЕ ВОЗДУШНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Цель работы. Научиться экспериментально определять параметры воздушного трансформатора и строить векторные диаграммы для различных режимов его работы.

Пояснения к работе

Трансформатор предназначен для преобразования величин переменных токов и напряжений при неизменной частоте. В простейшем случае он представляет собою две неподвижные индуктивно связанные катушки. Одна из катушек трансформатора, к которой подводится питание, называется первичной, другая, к которой присоединяется нагрузка – вторичной. Передача энергии из одной цепи в другую происходит благодаря явлению взаимной индукции. Обычно катушки помещаются на сердечник из ферромагнитного материала; если же такого сердечника нет, то трансформатор называют воздушным. Схема воздушного трансформатора представлена на рис. 5.1.

При выбранных положительных направлениях токов уравнения воздушного трансформатора имеют вид:

$$\begin{cases} I_1(R_1 + j\omega L_1) - I_2 j\omega M = U_1, \\ U_2 + I_2(R_2 + j\omega L_2) - j\omega M I_1 = 0. \end{cases}$$

Здесь L_1 и L_2 – индуктивности катушек; R_1 и R_2 – их активные сопротивления; M – взаимная индуктивность.

Этим уравнениям соответствует качественная векторная диаграмма трансформатора при произвольной нагрузке ($\varphi_H > 0$), представленная на рис. 5.2.

Если начать построения со контура $cfdc$ и принять в нем

$$I_2 = I_2,$$

$$U_2 = U_2 e^{j\varphi_H} = U_{fc}, \quad U_{df} = R_2 I_2, \quad U_{hd} = j\omega M I_2, \quad \text{затем}$$

$$U_{ch} = -U_{fc} - U_{df} - U_{hd}, \quad \text{тогда } I_1 = U_{ch} / (-j\omega M), \quad \text{далее}$$

$$U_{ec} = -j\omega M I_2, \quad U_{be} = j\omega L_1 I_1, \quad U_{ab} = R_1 I_1 \quad \text{и, наконец,}$$

$$U_1 = U_{ac} = U_{ec} + U_{be} + U_{ab}.$$

27

В режиме холостого хода трансформатора ($z_H = \infty, I_2 = 0$) его уравнения упрощаются и приводятся к следующим формулам для определения параметров первичной обмотки трансформатора:

$$z_{1X} = \frac{U_{1X}}{I_{1X}} = \sqrt{R_1^2 + X_{L1}^2}, \quad R_1 = \frac{P_{1X}}{I_{1X}^2},$$

$$X_L = \omega L = \sqrt{Z_{1X}^2 - R^2}, \quad L = \frac{X_L}{\omega}.$$

$$\text{Взаимная индуктивность: } M = \frac{U_{2X}}{\omega I_{1X}}.$$

Если катушки, образующие воздушный трансформатор, одинаковы, то $R_2 = R_1, L_2 = L_1$.

$$\text{Коэффициент трансформации: } n_T \approx \frac{U_1}{U_{2X}} \approx \frac{L_1}{M}.$$

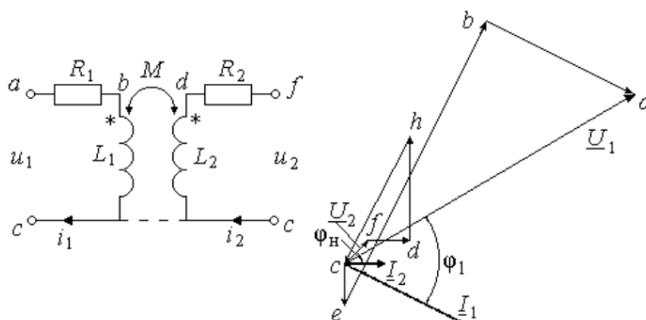


Рис. 5.1

Рис. 5.2

Схема электрической цепи

Питание цепи, схема которой показана на рис. 5.3, осуществляется от источника синусоидального напряжения с ЭДС 200 В и частотой 50 Гц.

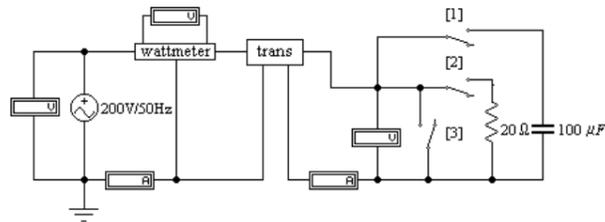


Рис. 5.3

Исследуемый двухобмоточный трансформатор представлен в схеме блоком «**trans**», который следует извлечь из поля вспомогательных компонентов «**Favorites**» в соответствии с номером своего варианта. Там же находится блок для измерения активной мощности **wattmeter**.

С помощью ключей K_1 , K_2 , K_3 , управляющие клавиши которых указаны на схеме в квадратных скобках, можно осуществить режимы холостого хода и короткого замыкания трансформатора, а также подключить к нему активную или емкостную нагрузку.

Подготовка к работе

Ответить на следующие вопросы:

1. Почему трансформатор не может работать на постоянном токе?
2. Запишите основные уравнения воздушного трансформатора.
3. Как опытным путем определить взаимную индуктивность воздушного трансформатора, активное сопротивление, индуктивность?
4. Как найти коэффициент трансформации воздушного трансформатора?
5. Построить качественную векторную диаграмму для воздушного трансформатора при емкостной нагрузке.

Программа работы

1. Открыть файл **LW5** и из поля вспомогательных компонентов **Favorites** извлечь блок **trans** с номером своего варианта. Двойным щелчком левой кнопки мыши открыть окно и повторить двойной щелчок на изображении трансформатора. Выбрать модель **ideal**, щелкнуть по **edit** и задать параметры трансформатора: $N = 0,915$, $LE = 0,02$, $LM = 0,1$, $RP = 1e-06$, $RS = 1e-06$. Затем закрыть блок

trans, щелкнув **OK**. Извлечь также блок **wattmeter** и собрать остальную часть схемы, показанной на рис. 5.3.

2. При помощи ключей K_1 , K_2 , K_3 осуществить четыре режима работы трансформатора: холостой ход, короткое замыкание, емкостную и активную нагрузки при неизменном действующем значении входного напряжения. Показания приборов внести в табл.5.1
3. По результатам измерений в режиме холостого хода определить параметры схемы замещения трансформатора $L_1 = L_2 = L$, $R_1 = R_2 = R$, M и его коэффициент трансформации n_T .

Таблица 5.1

U_1	I_1	P_1	φ_1	U_2	I_2	P_2	Характер нагрузки
В	А	Вт	-	В	А	Вт	
					0	0	холостой ход
				0		0	короткое замыкание
						0	емкость
							активная нагрузка

4. Вычислить падения напряжения на элементах схемы замещения трансформатора во всех исследуемых режимах работы. Результаты вычислений внести в табл. 5.2.

Таблица 5.2

I_2	U_2	φ_H	I_1	$U_{R2} = I_2 R_2$	$U_{X2} = I_2 X_{L2}$	$U_{R1} = I_1 R_1$	$U_{X1} = I_1 X_{L1}$	$U_{M1} = I_2 X_M$	Нагрузка
А	В	град	А	В	В	В	В	В	
0		-		0	0				XX
	0	-							K3
		-90							C
		0							R

5. Построить топографические диаграммы напряжений и лучевые диаграммы токов для всех проведенных опытов, используя данные табл. 5.2.

Указания:

Во всех режимах, кроме холостого хода, построение векторной диаграммы следует начинать с тока I_2 .

6. Сравнить значения входного напряжения U_1 и угла сдвига фаз напряжения и тока φ_1 , полученные из опыта и из векторных диаграмм для каждого случая.
7. Сделать выводы по работе.

РАБОТА 6

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА НАПРЯЖЕНИЙ

Цель работы. Изучение и экспериментальное исследование резонанса в цепи с последовательным соединением катушки индуктивности и конденсатора.

Пояснения к работе

Резонансом называют такой режим работы пассивной цепи, при котором входной ток совпадает по фазе с входным напряжением, несмотря на наличие в цепи реактивных элементов.

Если цепь представляет собой последовательное соединение двухполюсников, содержащих реактивные элементы разного характера, то возникновение резонанса объясняется взаимной компенсацией реактивных составляющих напряжений на этих двухполюсниках. В этом случае говорят о резонансе напряжений.

Простейший вариант такого резонанса получается при последовательном соединении катушки индуктивности с параметрами R, L и конденсатора с емкостью C (рис.6.1).

При питании этой цепи от источника синусоидального напряжения $u = U\sqrt{2} \sin(\omega t)$, в ней протекает ток $i = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$, где

$$I = \frac{U}{z}, \quad z = \sqrt{R^2 + X^2}, \quad X = X_L - X_C,$$

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C}, \quad \varphi = \arctg \frac{X}{R}.$$

Отсюда ясно, что ток совпадает по фазе с напряжением ($\varphi = 0$) при условии $X = 0$, т.е. в данном случае при $X_L = X_C$ или $\omega^2 LC = 1$. Таким образом, резонанса можно добиться, изменяя либо частоту, либо индуктивность, либо емкость. В частности, если заданы ω и L , то резонанс получится при емкости $C_{PEZ} = \frac{1}{\omega^2 L}$. В этом случае будут

31

равны напряжения на индуктивности $U_L = X_L I$ и емкости $U_C = X_C I$. Они могут превысить напряжение на входе цепи U (равное падению напряжения на активном сопротивлении $U_R = RI$), если характеристическое сопротивление контура $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ окажется больше его активного сопротивления R (иными словами, добротность контура $Q = \frac{\rho}{R} > 1$).

Схема электрической цепи

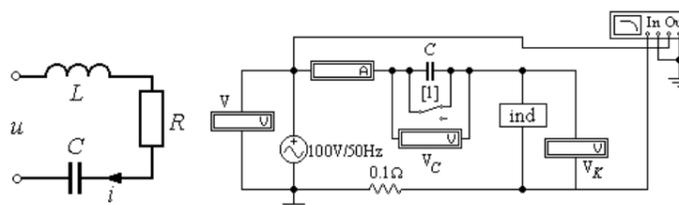


Рис. 6.1

Рис. 6.2

Схема, показанная на рис. 6.2, питается от источника синусоидального напряжения с действующим значением 100 В и частотой 50 Гц.

Катушка индуктивности представлена блоком **ind1 + ind10**, который нужно выбрать из поля подсхем **Favorites** по указанию преподавателя. Роль фазометра в схеме исполняет прибор **Bode-Plotter**, пределы измерения которого от -90° до $+90^\circ$ уже установлены. Каждому измерению угла сдвига фаз напряжения и тока на входе схемы должно предшествовать отключение **О** и включение **И** кнопки «**Пуск**» в верхнем правом углу экрана (перезапуск моделирования данного режима).

При замкнутом ключе, который управляется клавишей **1**, по показаниям приборов можно вычислить параметры катушки. А при разомкнутом – оценить влияние емкости конденсатора на значения тока и угла сдвига фаз тока и напряжения на входе схемы.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на вопросы.

1. Какой режим работы электрической цепи называют резонансом напряжений?
2. Изменением каких параметров цепи или источника питания в схеме, изображенной на рис. 6.1, можно добиться резонанса? Записать его условие для этой схемы.
3. Как по величине входного тока установить, что достигнут резонанс?
4. При каком соотношении параметров цепи напряжения на реактивных элементах могут быть значительно больше входного? Как определить добротность контура?
5. Как экспериментально определить параметры катушки R, L и как вычислить резонансную емкость? Запишите формулы.
6. Построить качественные векторные диаграммы для схемы рис. 6.1 при трех значениях емкости: $C = C_{рез}$, $C < C_{рез}$, $C > C_{рез}$.
7. Как меняется знак угла сдвига фаз напряжения и тока φ при изменении емкости от нуля и до бесконечности?

Программа работы

1. Открыть файл **LW6**. Из поля подсхем **Favorites** извлечь блок катушки индуктивности **ind** с номером своего варианта, а из поля КИП **Instruments** – прибор **Bode-Plotter**. Собрать остальную часть схемы.
2. Снять показания приборов при замкнутом ключе и записать их в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Показания приборов			Результаты расчета						
U	I	φ	z	R	X_L	L	$C_{рез}$	ρ	Q
В	А	град	Ом	Ом	Ом	Гн	мкФ	Ом	–

3. По результатам измерений определить параметры катушки индуктивности. Вычислить резонансную емкость, характеристическое сопротивление и добротность резонансной цепи. Результаты вычислений внести в ту же таблицу.
4. Разомкнуть ключ и снять показания приборов при пяти различных значениях емкости: $C = C_{рез}$, два значения $C < C_{рез}$, и два значения $C > C_{рез}$. Результаты измерений внести в табл. 6.2.

33

Указание. Для измерения фазы необходимо перезапускать схему при каждом изменении её параметров.

Таблица 6.2

U	C	I	U_C	U_K	φ
В	мкФ	А	В	В	град

5. Рассчитать ток в цепи и напряжения на элементах схемы для трех режимов из п. 4 ($C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$, $C > C_{рез}$). Угол сдвига фаз вычислить по формуле $\varphi = \arctg \frac{X}{R}$. Результаты внести в табл. 6.3 и сравнить с данными опыта по п. 4.
6. Построить векторные диаграммы по результатам расчета.

Таблица 6.3

U	C	X_C	X	z	I	U_C	U_L	U_R	U_K	φ
В	мкФ	Ом	Ом	Ом	А	В	В	В	В	В

7. Построить графики зависимостей $\varphi(C)$ и $I(C)$ по данным табл. 6.2.
8. Сравнить результаты эксперимента и расчета, проанализировать зависимости п. 7, сделать общие выводы по работе.

РАБОТА 7

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСА ТОКОВ

Цель работы. Изучение и экспериментальное исследование резонанса при параллельном соединении катушки индуктивности и конденсатора переменной емкости.

Пояснения к работе

34

Явление совпадения по фазе тока и напряжения на входе пассивной цепи, содержащей индуктивности и емкости, называют резонансом. Если он происходит за счет взаимной компенсации реактивных составляющих токов в параллельно включенных двухполюсниках с реактивными элементами разного характера, то говорят о резонансе токов. Простейший случай такого резонанса имеет место в цепи с параллельным соединением катушки индуктивности с параметрами R, L и конденсатора C (рис. 7.1).

Если к этой цепи приложено синусоидальное напряжение $u = U\sqrt{2} \sin(\omega t)$, то ток равен $i = I\sqrt{2} \sin(\omega t - \varphi)$, где

$$I = yU, \quad y = \sqrt{g^2 + b^2}, \quad g = \frac{R}{z_K}, \quad b = b_K - b_C,$$

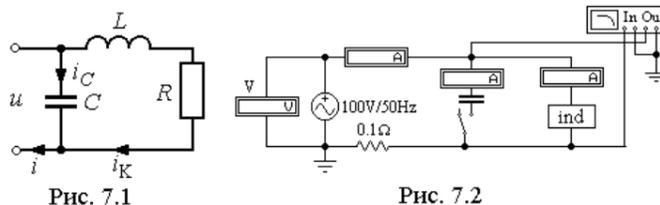
$$b_C = \omega C, \quad b_K = \frac{\omega L}{z_K}, \quad z_K = \sqrt{R^2 + (\omega L)^2}, \quad \varphi = \arctg \frac{b}{g}.$$

Отсюда ясно, что входной ток совпадает по фазе с напряжением ($\varphi = 0$) при условии равенства нулю входной реактивной проводимости ($b = 0$). Резонанса можно добиться либо изменением частоты приложенного напряжения, либо изменением параметров цепи.

Например, при заданных R, L, ω резонанс получится при $C_{PE3} = \frac{L}{z_K^2}$.

При резонансе токи в параллельных ветвях схемы рис. 7.1 $I_C = \omega C U$ и $I_K = \frac{U}{z_K}$ могут во много раз превышать входной ток $I = Uy$, если $\omega C_{PE3} > g$.

Схема электрической цепи



Схема, показанная на рис. 7.2 питается от источника синусоидального напряжения с действующим значением 100 В и

частотой 50 Гц. Катушка индуктивности в схеме представлена блоком **ind1 ÷ ind10**, который нужно выбрать из поля подсхем **Favorites** по указанию преподавателя.

Роль фазометра в схеме исполняет прибор **Bode-Plotter**, пределы измерения которого от -90° до $+90^\circ$ уже установлены. Каждому измерению угла сдвига фаз напряжения и тока на входе схемы должно предшествовать отключение **O** и включение **I** кнопки «Пуск» в верхнем правом углу экрана (перезапуск моделирования данного режима).

При разомкнутом ключе, который управляется клавишей **1**, по показаниям приборов можно вычислить параметры катушки, при замкнутом – оценить влияние емкости конденсатора на значения тока и угла сдвига фаз напряжения и тока на входе схемы.

Подготовка к работе

Проработав теоретический материал, ответить на следующие вопросы.

1. Какой режим работы электрической цепи называется резонансом токов?
2. Записать условие резонанса для схемы рис. 7.3 и вывести из него, как частный случай, условие резонанса для схемы рис. 7.1. Изменением каких величин можно добиться резонанса токов в исследуемой цепи?
3. Как по величине входного тока установить, что достигнут резонанс?
4. Построить качественные векторные диаграммы токов для различных емкостей: при $C = C_{рез}$, $C < C_{рез}$, $C > C_{рез}$.
5. Как будет изменяться ток в индуктивности в этих случаях при $U = const$?
6. Как меняется знак угла сдвига фаз φ в тех же случаях? К каким значениям стремится этот угол при $C \rightarrow 0$ и $C \rightarrow \infty$?
7. При каком соотношении параметров цепи в режиме резонанса токи в параллельных ветвях превысят ток на входе цепи?

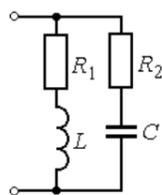


Рис. 7.3

Программа работы

1. Открыть файл **LW7**. Из поля подсхем **Favorites** извлечь блок катушки индуктивности **ind** с номером своего варианта, а из поля КИП **Instruments** – прибор **Bode-Plotter**. Собрать остальную часть схемы.
2. Снять показания приборов при разомкнутом ключе и записать их в табл. 7.1.

Таблица 7.1

Показания приборов				Результаты вычислений			
U	I	φ	z	R	X_L	L	$C_{рез}$
В	А	град	Ом	Ом	Ом	Гн	мкФ

3. По результатам измерений определить параметры катушки индуктивности. Вычислить резонансную емкость. Результаты вычислений внести в ту же таблицу.
4. Замкнуть ключ и снять показания приборов при пяти различных значениях емкости: двух значениях $C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$, и двух значениях $C > C_{рез}$. Результаты измерений внести в табл.7.2.

Таблица 7.2

U	C	I	I_C	I_K	φ
В	мкФ	А	А	А	град

5. Рассчитать ток в цепи и напряжение на элементах схемы для трех режимов из п. 4 ($C < C_{рез}$, $C = C_{рез}$, $C > C_{рез}$). Угол сдвига фаз напряжения и тока на входе цепи вычислить по формуле $\varphi = \arctg \frac{b}{g}$. Результаты внести в табл. 7.3 и сравнить с данными опыта по п. 4.
6. Построить векторные диаграммы по результатам расчета п. 5.
7. Построить графики зависимостей $\varphi(C)$ и $I(C)$ по данным табл. 7.2.

37

Таблица 7.3

U	C	ωC	b	g	I	I_C	I_K	φ
В	мкФ	См	См	См	А	А	А	град

8. Сравнить результаты эксперимента и расчета, проанализировать зависимости п.7, сделать общие выводы по работе.

РАБОТА 8

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАССИВНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА

Цель работы. Научиться определять коэффициенты четырехполосника по результатам эксперимента, строить круговую диаграмму и использовать ее для анализа режимов работы.

Пояснения к работе

Для любого пассивного четырехполосника (см. рис. 8.1) уравнения связи входных и выходных напряжений и токов могут быть записаны в различных формах.

Наиболее часто используется так называемая форма А:

$$\begin{cases} U_1 = AU_2 + BI_2 \\ I_1 = CU_2 + DI_2 \end{cases}$$



Рис. 8.1

Здесь A, B, C, D – комплексные коэффициенты (постоянные четырехполосника), удовлетворяющие равенству $AD - BC = 1$.

Их можно определить из опытов холостого хода и короткого замыкания по формулам:

$$A = \sqrt{\frac{Z_{1X}}{Z_{2X} - Z_{2K}}}, \quad B = AZ_{2K}, \quad C = \frac{A}{Z_{1X}}, \quad D = \frac{B}{Z_{1K}}.$$

Здесь Z_{1K} и Z_{1X} – сопротивления в режимах прямого короткого замыкания и холостого хода относительно входных зажимов, Z_{2K} и Z_{2X}

38

– аналогичные величины при обратном включении. Для симметричного четырехполюсника $Z_{1K} = Z_{2K}$ и $Z_{1X} = Z_{2X}$, что приводит к равенству $\underline{A} = \underline{D}$.

Если напряжение на входе четырехполюсника постоянно ($\underline{U}_1 = \text{const}$), то его входной ток можно определить из соотношения

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_{1X} + \frac{\underline{I}_{1K} - \underline{I}_{1X}}{1 + \frac{z_H}{z_{2K}} e^{j(\varphi_H - \varphi_{2K})}}$$

При изменении величины сопротивления нагрузки $|Z_H|$ без изменения его характера ($\varphi_H = \text{const}$) данное соотношение – уравнение дуги окружности с хордой $\underline{I}_{1K} - \underline{I}_{1X}$.

Построенный по этому уравнению на комплексной плоскости годограф вектора тока \underline{I}_1 , названный круговой диаграммой, используется в данной работе для определения величин I_1, I_2, U_2, P_1, P_2 в режиме активной нагрузки. Пример круговой диаграммы приведен на рис. 8.2.

Порядок построения круговой диаграммы

1. Выбирается масштаб входного напряжения m_{U1} и изображается вектор \underline{U}_1 .
2. Выбирается масштаб входного тока m_{I1} и изображаются векторы токов \underline{I}_{1X} и \underline{I}_{1K} .
3. Соединяются точки x и k , ограничивающие отрезок \overline{xk} – хорду окружности.
4. Выбирается масштаб сопротивления m_z и на хорде \overline{xk} откладывается отрезок $\overline{xn} = \frac{z_{2k}}{m_z}$.
5. Проводится линия переменного параметра \overline{nm} под углом $\delta = \varphi_{2K} - \varphi_H$ к хорде \overline{xk} (на рис. 8.2 угол $\delta > 0$).
6. Находится центр окружности диаграммы c , лежащий на пересечении перпендикуляров, проведенных к середине хорды \overline{xk} и из точки x к линии переменного параметра или ее продолжению.
7. Между точками xk со стороны линии переменного параметра проводится дуга окружности радиусом Cx – это и есть круговая диаграмма.

39

Точка A , характеризующая рабочий режим, лежит на пересечении дуги окружности с прямой, соединяющей точку x с m' . Отрезок $\overline{nm'}$ в масштабе m_z определяет конкретное сопротивление z_H .

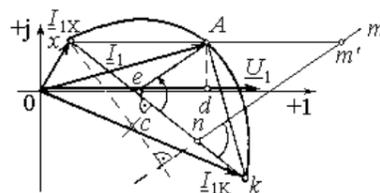


Рис. 8.2

Отрезки \overline{xA} и \overline{Ak} пропорциональны соответственно току I_2 и напряжению U_2 . Масштабы m_{I2} и m_{U2} удобно определять из опытов короткого замыкания и холостого хода:

$$m_{I2} = \frac{I_{2K}}{xk}, \quad m_{U2} = \frac{U_{2X}}{xk}$$

8. Отрезки \overline{Od} и \overline{Ae} пропорциональны P_1 и P_2 соответственно (масштаб $m_P = U_1 m_{I1}$, $Ae \parallel mn$).

Схема электрической цепи

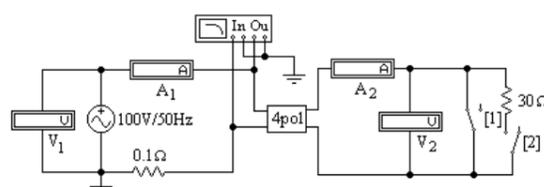


Рис. 8.3

Электрическая цепь, схема которой показана на рис. 8.3, питается от источника синусоидального напряжения с ЭДС 100 В и частотой 50 Гц. Исследуемый четырехполюсник представлен в схеме блоком **4pol1+4pol10** из набора подсхем в поле вспомогательных компонентов **Favorites**. Роль фазометра в схеме исполняет прибор **Bode-Plotter**, пределы измерения которого от -90° до $+90^\circ$ уже установлены. Каждому измерению угла сдвига фаз напряжения и тока на входе

40

схемы должно предшествовать отключение **О** и включение **И** кнопки «**Пуск**» в верхнем правом углу экрана (перезапуск моделирования данного режима).

С помощью ключей K_1 и K_2 , индексы которых соответствуют управляющим клавишам, указанным на схеме в квадратных скобках, можно осуществить режимы холостого хода и короткого замыкания четырехполюсника или подключить к нему активную нагрузку.

Подготовка к работе

Изучив соответствующие разделы теории, ответить на следующие вопросы.

1. Записать уравнения четырехполюсника (форма А) при прямом включении для режимов короткого замыкания, холостого хода и произвольной нагрузки.
2. Какие опыты необходимы для экспериментального определения коэффициентов A, B, C, D ?
3. Какие величины нужно знать заранее для построения круговой диаграммы? Как строится круговая диаграмма?
4. Какие величины можно определить по круговой диаграмме?

Программа работы

1. Открыть файл **LW7**. Из поля подсхем **Favorites** извлечь блок четырехполюсника **4pol** с номером своего варианта, а из поля КИП **Instruments** – прибор **Bode-Plotter**. Собрать остальную часть схемы.
2. Произвести измерения величин I_1, φ_1, I_2, U_2 при неизменном входном напряжении U_1 в трех режимах: холостой ход (оба ключа разомкнуты), короткое замыкание (ключ K_1 замкнут) и активная нагрузка (K_2 замкнут, K_1 разомкнут). Внести показания приборов в табл. 8.1 (для измерения угла сдвига фаз напряжения и тока на входе четырехполюсника необходимо перезапускать схему при каждом изменении режима работы).
3. Подсчитать во всех трех режимах величины

$$P_1 = U_1 I_1 \cos \varphi_1, \quad P_2 = U_2 I_2, \quad R_H = \frac{U_2}{I_2}, \quad Z_1 = \frac{U_1}{I_1} e^{j\varphi_1}.$$

Результаты вычислений внести в ту же таблицу.

Таблица 8.1

$U_1 = \text{const}$								Примечание
Данные опыта				Результаты расчета				
I_1	φ_1	U_2	I_2	P_1	P_2	R_H	Z_1	
А	град	В	А	Вт	Вт	Ом	Ом	
			0		0	∞		холостой ход
							-	активная нагрузка
		0			0	0		короткое замыкание

4. Поменять местами в схеме входные и выходные зажимы четырехполюсника (обратное включение). Повторить опыты холостого хода и короткого замыкания. Показания приборов внести в табл. 8.2. Туда же записать результаты вычислений Z_{2X} и Z_{2K} .
5. Определить коэффициенты A, B, C, D четырехполюсника по входным сопротивлениям режимов прямого и обратного холостого хода и короткого замыкания. Проверить правильность их определения по условию $AD - BC = 1$.

Таблица 8.2

Наименование опыта	Опыт		Расчет		Примечание
	U	I	φ	Z	
	В	А	град	Ом	
Обратный х.х.					$Z = Z_{2X}$
Обратное к.з.					$Z = Z_{2K}$

6. Построить по данным опытов прямого холостого хода и короткого замыкания, а также обратного короткого замыкания круговую диаграмму четырехполюсника.

Таблица 8.3

Масштабы	m_Z		m_{I_1}	m_{I_2}	m_{U_2}	m_P	
	Ом/см	Ом/см	А/см	А/см	В/см	Вт/см	Вт/см
Длины отрезков	xn	nm'	OA	xA	Ak	Ae	Ad
Величины	z_{2K}	z_H	I_1	I_2	U_2	P_2	P_1
	Ом	Ом	А	А	В	Вт	Вт

7. Определить из круговой диаграммы величины I_1, P_1, P_2, U_2, I_2 для того же значения R_H , что и в п. 2. Результаты внести в табл.8.3.
8. Сравнить результаты опыта и расчета. Сделать выводы по работе.

РАБОТА 9

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ЗВЕЗДОЙ

Цель работы. Ознакомиться со свойствами трехфазной цепи, соединенной звездой с нулевым проводом и без него, при симметричной системе напряжений источника и симметричной и несимметричной нагрузках; научиться строить векторные диаграммы для трехфазной цепи по результатам эксперимента.

Пояснения к работе

При соединении трехфазной цепи звездой линейный ток равен фазному, а линейное напряжение равно разности фазных напряжений, например: $U_{AB} = U_A - U_B$.

В симметричном режиме $U_{\text{л}} = \sqrt{3}U_{\text{ф}}$.

Несимметричная нагрузка в цепи без нулевого провода вызывает появление напряжения между нейтральными точками приемника и генератора, что приводит к несимметрии фазных напряжений приемника. Если к сети трехфазного тока подключить приемник, состоящий из катушки индуктивности или конденсатора и двух одинаковых активных сопротивлений, то по смещению нейтральной точки можно определить порядок чередования фаз.

В трехфазных цепях с нулевым проводом несимметрия нагрузки вызывает ток в нулевом проводе, напряжения же фаз приемника остаются практически симметричными.

Схема электрической цепи

В работе проводится исследование цепи, схема которой показана на рис.9.1. Питание цепи осуществляется от трех источников синусоидального напряжения частотой 50 Гц. ЭДС источников имеют одинаковую амплитуду, а их фазы сдвинуты на 120° так, что образуют симметричную систему прямой последовательности. Значения ЭДС и параметров нагрузки, соответствующие варианту цепи, номер которого указывает преподаватель, приведены в табл. 9.1.

43

С помощью ключей $K_1 \div K_4$, номера управляющих клавиш которых соответствуют их индексам (на схеме указаны в квадратных скобках), можно изменять характер нагрузки в фазе A , а с помощью ключа K_5 – подключать и отключать нулевой провод.

Для изменения активного сопротивления фазы A следует после двойного щелчка левой кнопкой мыши, когда курсор находится на символе этого сопротивления в схеме, вдвое уменьшить или увеличить значение сопротивления по сравнению с табличным.

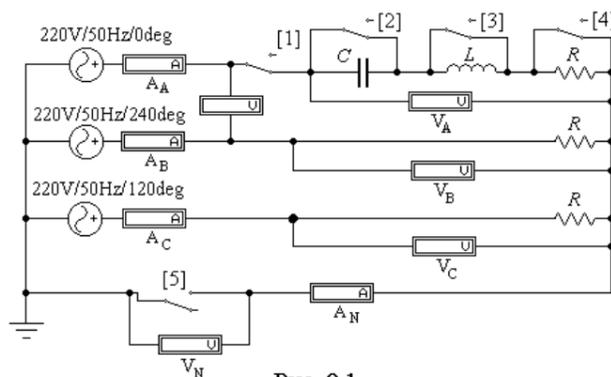


Рис. 9.1

Вольтметр V измеряет линейное напряжение, вольтметр V_N – напряжение смещения нейтрали нагрузки, остальные – фазные напряжения нагрузки. Амперметр A_N показывает ток в нулевом проводе, остальные – линейные токи.

Подготовка к работе

Проработав материал, ответить на вопросы:

1. Какая нагрузка считается симметричной? Какой трехфазный источник называют симметричным?
2. Что такое фазные и линейные напряжения? Записать уравнения связи между линейными и фазными напряжениями при соединении нагрузки симметричной и несимметричной звездой.
3. В схеме без нулевого провода (рис. 9.2, а) уменьшение (увеличение) активной нагрузки фазы A приводит к смещению нулевой точки нагрузки на диаграмме напряжений. В какую по сравнению с симметричной звездой сторону?

44

- Куда сместится нулевая точка на диаграмме в случае короткого замыкания фазы A и куда – при отключении нагрузки фазы A ?
- Возможно ли смещение нейтральной точки нагрузки на диаграмме напряжений при включенном нулевом проводе, если его сопротивление равно нулю?

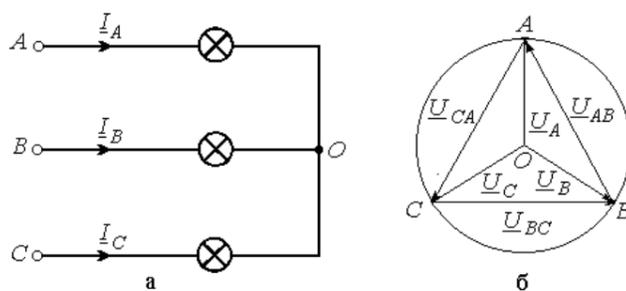


Рис. 9.2

- Почему нельзя делать опыт короткого замыкания фазы при включенном нулевом проводе?

Для случая включения в фазу A катушки с параметрами R, L (цепь без нулевого провода) на диаграмме построены все напряжения и токи двух других фаз (рис. 9.3). Как, зная токи в фазах B и C , по диаграмме определить направление вектора тока фазы A и угол сдвига фаз φ катушки? И как затем рассчитать ее параметры, используя измеренные ток и напряжение на катушке?

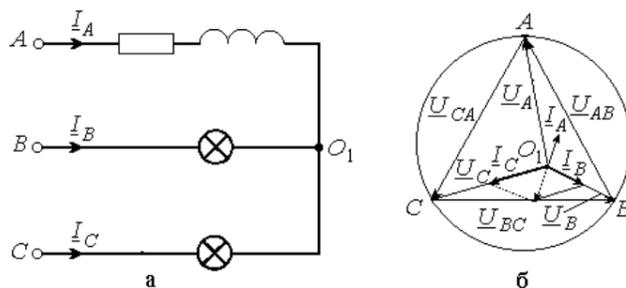


Рис. 9.3

- Куда сместится нейтральная точка O_1 на диаграмме рис. 9.3,б, если в фазу A схемы рис. 9.3,а вместо катушки включить конденсатор?

Программа работы

- Собрать схему, показанную на рис. 9.1, и установить ее параметры согласно табл.9.1 в соответствии со своим вариантом схемы.

Таблица 9.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E (В)	380	220	127	380	220	127	380	220	127	380
R (Ом)	200	150	100	250	200	150	300	250	200	150
L (мГн)	0,64	0,48	0,32	0,8	0,64	0,48	0,95	0,8	0,64	0,48
C (мкФ)	16	21,2	31,8	12,7	16	21,2	10,6	12,7	16	21,2

- Снять показания приборов в симметричном режиме (замкнуты ключи $K_1 + K_3$, разомкнут K_4) и подсчитать отношение U_L/U_Φ .

Указание: убедиться, что включение и отключение нулевого провода с помощью ключа K_5 не влияет на показания приборов.

Результаты измерений внести в верхнюю строку табл. 9.2.

Таблица 9.2

Показания приборов										Из диаграммы	Характер нагрузки особой фазы	Примечание
U_A	U_B	U_C	I_A	I_B	I_C	I_N	U_N	I_N	U_N			
В	В	В	А	А	А	А	В	А	В			
						0	0		0			Симм. режим
						0						Схема без нулевого провода
						0						
						0						
						0						
							0		0			Схема с нулевым проводом
							0		0			
							0		0			
							0		0			
						0						К.З. без нул. пр.

- Исследовать трехпроводную (без нулевого провода - K_5 разомкнут) и четырехпроводную (с нулевым проводом - K_5 замкнут) цепь в следующих режимах:

- а) уменьшение активной нагрузки в фазе A , для чего сопротивление в фазе A следует увеличить вдвое по сравнению с табличным значением;
 - б) увеличение активной нагрузки в фазе A , для чего сопротивление в фазе A следует уменьшить вдвое по сравнению с его табличным значением;
 - в) отключение нагрузки в фазе A (разомкнуть ключ K_1);
 - г) включение индуктивности в фазу A (при замкнутых ключах K_1, K_2, K_4 , разомкнуть ключ K_3);
 - д) включение емкости в фазу A (при замкнутых ключах K_1, K_3, K_4 , разомкнуть ключ K_2).
4. Снять показания приборов в режиме короткого замыкания фазы A **при разомкнутом нулевом проводе**, для чего необходимо замкнуть ключи $K_1 - K_4$ и разомкнуть ключ K_5 . Результаты всех измерений (пп. 3, 4) внести в табл.9.2.
 5. Построить топографические диаграммы напряжений, совмещенные с лучевыми диаграммами токов для всех режимов. *Указание.* Всего 12 диаграмм, построение каждой из которых следует начинать с неизменного для всех диаграмм равностороннего треугольника линейных напряжений. Положение нейтральной точки нагрузки на диаграммах несимметричных режимов п. 3 при отсутствии нулевого провода определяется с помощью засечек циркулем. При наличии нулевого провода эта точка лежит в центре тяжести треугольника.
 6. Определить ток в нулевом проводе I_N из векторных диаграмм для четырехпроводной цепи и напряжение смещения нейтралей U_N из диаграмм для трехпроводной цепи. Результаты также внести в табл.9.2 и построить графики зависимостей U_A и U_N от тока фазы A при изменении её активной нагрузки от холостого хода до короткого замыкания.
 7. Проанализировать диаграммы и сформулировать выводы по работе.

РАБОТА 10

ИССЛЕДОВАНИЕ ТРЕХФАЗНОЙ ЦЕПИ, СОЕДИНЕННОЙ ТРЕУГОЛЬНИКОМ

Цель работы. Расширение практических навыков исследования трехфазных цепей; измерение напряжений, токов, мощности при

47

симметричной и несимметричной нагрузке, соединенной треугольником.

Пояснения к работе

При соединении трехфазной цепи треугольником линейное напряжение равно фазному, а линейный ток равен разности фазных токов, например: $I_A = I_{AB} - I_{CA}$. В частном случае, когда цепь симметрична, $I_L = \sqrt{3} I_\phi$. Измерение активной мощности трехфазной симметричной цепи можно произвести, измерив мощность одной фазы P_ϕ . Мощность всей цепи определится из равенства $P = 3P_\phi$. В несимметричных трехфазных цепях без нулевого провода мощность может быть измерена с помощью двух ваттметров (рис. 10.1). Мощность всей цепи $P_{\text{оп}} = P_1 + P_2$, где P_1 и P_2 – показания первого и второго ваттметров. При расчете:

$$P_{\text{расч}} = U_{AB} I_{AB} \cos \phi_{AB} + U_{BC} I_{BC} \cos \phi_{BC} + U_{CA} I_{CA} \cos \phi_{CA}$$

Схема электрической цепи

В работе проводится исследование цепи, схема которой показана на рис. 10.1. Питание цепи осуществляется от трех источников синусоидального напряжения частотой 50 Гц. Действующие значения ЭДС этих источников одинаковы, а их фазы отличаются на 120° , так что напряжения образуют симметричную систему прямой последовательности. Значения ЭДС и параметров нагрузки, соответствующие варианту цепи, номер которого указывает преподаватель, приведены в табл. 10.1.

С помощью ключей $K_1 - K_4$, номера управляющих клавиш которых соответствуют их индексам (на схеме указаны в квадратных скобках), можно изменять характер нагрузки в фазе AB . Для изменения активного сопротивления фазы AB следует после двойного щелчка левой кнопкой мыши, когда курсор находится на символе этого сопротивления в схеме, вдвое уменьшить или увеличить значение сопротивления по сравнению с табличным.

48

Вольтметр V измеряет линейное напряжение, амперметры A_A, A_B, A_C – линейные токи, остальные – фазные токи. В качестве ваттметров используются приборы W_1 и W_2 , к выходным зажимам которых подключены вольтметры, чьи показания в вольтах численно равны показаниям ваттметров в ваттах. Сумма показаний этих приборов равна активной мощности цепи.

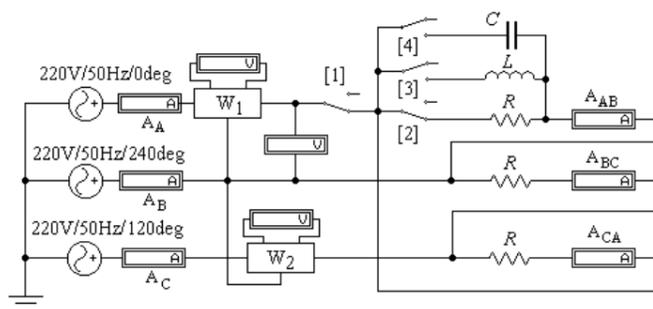


Рис. 10.1

Подготовка к работе

Проработав материал, ответить на вопросы.

1. Что такое линейные и фазные токи? Какие уравнения связывают линейные и фазные токи а) несимметричной и б) симметричной цепи, соединенной треугольником.
2. На каком принципе основано действие индукционного фазоуказателя? Как с его помощью определить порядок чередования фаз.
3. Исходная диаграмма напряжений и токов для симметричного треугольника дана на рис. 10.2:

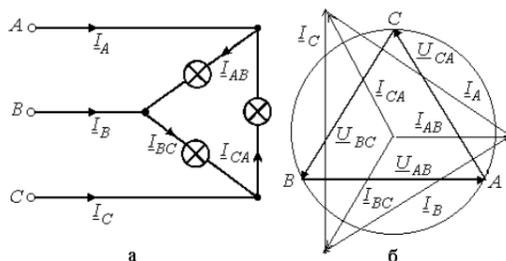


Рис.10.2

49

- а) как деформируется диаграмма токов в случае обрыва фазы AB ?
 - б) во что «выродится» диаграмма токов при обрыве линейного провода A ?
- Изобразить качественные диаграммы токов для случаев а) и б).

Программа работы

1. Открыть файл **LW10** и извлечь из поля вспомогательных компонентов **Favorites** две подсхемы (**Subcircuit**) **Wattmeter** (на рис. 10.1 – W_1 и W_2). Собрать остальную часть схемы, показанной на рис. 10.1, и установить ее параметры согласно табл. 10.1 в соответствии со своим вариантом схемы.

Таблица 10.1

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E (В)	380	220	127	380	220	127	380	220	127	380
R (Ом)	200	150	100	250	200	150	300	250	200	150
L (мГн)	0,64	0,48	0,32	0,8	0,64	0,48	0,95	0,8	0,64	0,48
C (мкФ)	16	21,2	31,8	12,7	16	21,2	10,6	12,7	16	21,2

2. Снять показания приборов в симметричном режиме (замкнуты ключи K_1, K_2 , разомкнуты K_3, K_4) и подсчитать отношение $I_{л}/I_{ф}$. Вычислить также активную мощность $P = 3U_{ф}I_{ф}$ ($\cos\varphi = 1$ для активной нагрузки).
3. Исследовать несимметричную цепь в следующих режимах:
 - а) уменьшение активной нагрузки в фазе AB , для чего сопротивление в этой фазе следует увеличить вдвое по сравнению с его табличным значением
 - б) увеличение активной нагрузки в фазе AB , для чего сопротивление в этой фазе следует уменьшить вдвое по сравнению с его табличным значением;
 - в) отключение нагрузки в фазе AB , для чего нужно разомкнуть ключи K_2, K_3, K_4 ;
 - г) включение индуктивности в фазу AB , для чего необходимо при замкнутых ключах K_1, K_3 , разомкнуть ключи K_2, K_4 ;
 - д) включение емкости в фазу AB (при замкнутых ключах K_1, K_4 , разомкнуть ключи K_2, K_3);
 - е) обрыв линейного провода A , для чего следует разомкнуть ключ K_1 при одинаковых активных сопротивлениях нагрузки всех трех фаз;

Результаты всех измерений (пп. 2, 3) внести в табл. 10.2. Туда же внести значения активной мощности цепи, подсчитанной как по закону

50

Джоуля-Ленца ($P = \sum I^2 R$), так и суммированием показаний ваттметров ($P = P_1 + P_2$).

Таблица 10.2

I_A	I_B	I_C	I_{AB}	I_{BC}	I_{CA}	P_1	P_2	$P_{\text{ОП}}$	$P_{\text{РАСЧ}}$	Характер нагрузки в фазе AB
А	А	А	А	А	А	Вт	Вт	Вт	Вт	
										Симметричная
										а)
										...
										е)

- Построить топографические диаграммы напряжений, совмещенных с лучевыми диаграммами токов для всех режимов.
Указание. Всего 5 диаграмм, построение каждой из которых следует начинать с неизменного для всех диаграмм равностороннего треугольника линейных напряжений. Лучевые диаграммы фазных токов удобно строить из центра тяжести этого треугольника. Если соединить концы векторов фазных токов, то должен получиться треугольник линейных токов (например, $I_A = I_{AB} - I_{CA}$).
- Проанализировать диаграммы и сформулировать выводы по работе.

РАБОТА 11

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ С ИСТОЧНИКОМ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель работы. Изучение влияния катушки индуктивности и конденсатора на форму кривой тока при питании цепи от источника периодического несинусоидального напряжения.

Пояснения к работе

Если к цепи приложено несинусоидальное напряжение, то форма кривой тока будет подобна форме кривой напряжения лишь в том случае, когда сопротивление цепи чисто активное. Если же в цепь включена катушка индуктивности или конденсатор, то форма кривой тока отличается от формы кривой напряжения.

При последовательном соединении индуктивности L и сопротивления R полное сопротивление цепи току k -й гармоники равно

51

$Z_k = \sqrt{R^2 + (k\omega L)^2}$. Следовательно, по мере увеличения порядка k гармоники это сопротивление увеличивается, амплитуда тока k -й гармоники уменьшается (по сравнению с чисто активной цепью, имеющей то же самое сопротивление R), и кривая тока будет меньше искажена, чем кривая напряжения.

Если же последовательно включены сопротивление R и емкость C , то полное сопротивление такой цепи току k -й гармоники равно

$Z_k = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{k\omega C}\right)^2}$. Значит, с увеличением порядка k гармоники это

сопротивление уменьшается, амплитуда тока соответствующей гармоники увеличивается, и кривая тока искажается сильнее (по сравнению с синусоидой), чем кривая приложенного к цепи напряжения.

Схема электрической цепи

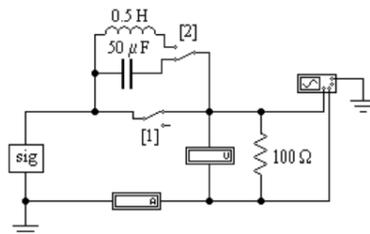


Рис. 11.1

Электрическая цепь, схема которой показана на рис. 11.1, питается от источника несинусоидального периодического напряжения, представленного подсхемой **sig**. На зажимы осциллографа подается напряжение с сопротивления 100 Ом. Поэтому при замкнутом ключе K_1 на экране осциллографа можно наблюдать кривую этого напряжения. При разомкнутом же ключе K_1 на экране осциллографа можно увидеть кривую тока в цепи с конденсатором или катушкой индуктивности в зависимости от положения ключа K_2 .

Подготовка к работе

Ответить на следующие вопросы.

- Как зависят индуктивное и емкостное сопротивление от частоты?

52

2. Чему равно сопротивление катушки индуктивности с параметрами R и L в цепи постоянного тока?
3. Резистор подключен к источнику несинусоидального напряжения. Отличаются ли по форме кривые тока и напряжения? Как изменяется форма кривых тока при включении последовательно с резистором:
 - а) индуктивности?
 - б) емкости?
4. Как вычисляются действующие значения несинусоидальных тока и напряжения?
5. Какие значения тока и напряжения измеряют приборы следующих систем:
 - а) электромагнитной (∇)?
 - б) электродинамической (\boxplus)?
 - в) магнитоэлектрической (Δ)?
 - г) магнитоэлектрической с выпрямителем (∇)?
6. Каким прибором можно зафиксировать мгновенное значение тока и напряжения?
7. Почему при увеличении активного сопротивления (рис. 11.1) в цепи с емкостью форма кривой тока становится менее искаженной?
8. Какие гармоники содержит разложение в ряд Фурье кривой, симметричной относительно оси абсцисс?

Программа работы

1. Открыть файл LW 11, извлечь из поля компонентов **Favorites** подсхему **sig** с номером своего варианта, а из поля КИП (**Instruments**) – осциллограф (**Oscilloscop**). Собрать остальную часть схемы, показанной на рис. 11.1.
2. Проградуировать осциллограф в единицах напряжения, тока и времени. Для этого на шкале управления осциллографом выставить масштаб: по напряжению - 100 В/дел., по времени – 200 мс/дел. Масштаб тока при этом будет равен 500 мА/дел.
3. При замкнутом ключе K_1 снять осциллограмму несинусоидального напряжения источника. При помощи кнопки **Pause**, которая находится под кнопкой **Пуск** в правом верхнем углу экрана, получить изображение полного периода несинусоидального напряжения. Затем с помощью кнопки **Expand** на панели управления осциллографом получить увеличенное изображение экрана осциллографа. Обратный переход

53

осуществляется кнопкой **Reduce**. Перечертить осциллограмму на миллиметровку. Записать показание вольтметра.

4. Снять осциллограмму тока в цепи с индуктивностью, для чего необходимо разомкнуть ключ K_1 , и ключ K_2 переключить на индуктивность. Записать показание амперметра.
5. Снять осциллограмму тока в цепи с емкостью, для чего переключить K_2 в положение емкости. Записать показание амперметра.
6. Разложить кривую напряжения в п. 3 и кривые тока в п. 4 и п. 5 в ряд Фурье на гармоники не выше пятой и определить действующие значения напряжения и тока, сравнив их с показаниями вольтметра и амперметра.
Действующие значения тока и напряжения определяются по формулам:

$$U = \sqrt{\frac{U_{1m}^2 + U_{3m}^2 + U_{5m}^2}{2}}; \quad I = \sqrt{\frac{I_{1m}^2 + I_{3m}^2 + I_{5m}^2}{2}}.$$

7. Записать мгновенные значения одной из величин напряжения или тока по указанию преподавателя, построить её гармонические составляющие и, сложив их графически, сравнить результат с исходной кривой, полученной экспериментально.
8. Сделать выводы по работе.

ЛИТЕРАТУРА

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.Д., Страхов С.В. Основы теории цепей. М.: Энергоатомиздат, 1989, 528 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. М.: Высшая школа, 1996, 638 с.
3. Эськов В.Д., Носов Г.В., Исаев Ю.Н. Руководство к лабораторным работам по теоретическим основам электротехники. Часть 1., Томск: Изд-во ТПУ, 2001, 52 с.
4. Электротехника и электроника в экспериментах и упражнениях. Практикум на Electronics Workbench. Т.1,2 / Под ред. Д.И.Панфилова. Москва: изд. «Додека», 1999.

54

СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	3
Работа №1. Исследование линейной разветвленной цепи постоянного тока	7
Работа №2. Исследование активного двухполюсника	11
Работа №3. Конденсатор и катушка индуктивности в цепи синусоидального тока	16
Работа №4. Исследование цепей с индуктивно связанными элементами	21
Работа №5. Исследование воздушного трансформатора	27
Работа №6. Исследование резонанса напряжений	31
Работа №7. Исследование резонанса токов	34
Работа № 8. Исследование пассивного четырехполюсника	38
Работа №9. Исследование трехфазной цепи, соединенной звездой	43
Работа №10. Исследование трехфазной цепи, соединенной треугольником	47
Работа №11. Электрические цепи с источником несинусоидального напряжения	51
Литература.....	54

РУКОВОДСТВО К ЛАБОРАТОРНЫМ РАБОТАМ ПО ТЕОРЕТИЧЕСКИМ ОСНОВАМ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ В ПРОГРАММНОЙ СРЕДЕ ELECTRONICS WORKBENCH. ЧАСТЬ 1

Методические указания для студентов ЭЛТИ, ИДО, ИЭФ, ЭФФ, ФТФ.

Составители: Пустынников Сергей Владимирович
Эськов Владислав Дмитриевич

Подписано к печати
Формат 60x84/16. Бумага офсетная.
Печать RISO. Усл. печ. л. . Уч.-изд.л. .
Тираж экз. Заказ . Цена свободная.
Издательство ТПУ. 634050, Томск, пр.Ленина,30.