

Министерство образования Российской Федерации
Дальневосточный государственный технический университет
(ДВПИ имени В.В. Куйбышева)

**СБОРНИК ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ ПО КУРСУ
«ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ»**

ЧАСТЬ 1

Методические указания для студентов электротехнических и
радиотехнических специальностей
(очной и заочной форм обучения)

Владивосток

2003

Одобрено научно-методическим советом университета
УДК 621.3

Методические указания содержат описания, исходные данные и рекомендации к выполнению лабораторных работ по курсам «Теоретические основы электротехники (ТОЭ), часть 1» и «Основы теории электрических цепей (ОТЭЦ), часть 1».

Предназначены для студентов всех форм обучения.

Составители: Н.В.Киншт, М.А. Кац, Г.Н. Герасимова, Л.В. Глушак, Н.В. Силин, Л.С. Цовбун, преподаватели кафедры теоретической и общей электротехники.

Методические указания печатаются с оригинал-макета, подготовленного авторами

© Изд-во ДВГТУ, 2003

ВВЕДЕНИЕ

Методические указания обеспечивают лабораторный практикум 1-й части курсов ТОЭ и ОТЭЦ, изучаемых студентами электротехнических специальностей. На выполнение лабораторных работ по этой части курсов отводится 16 и 32 часа, в зависимости от специальности и формы обучения.

Методические указания охватывают работы по следующим разделам: основные свойства и эквивалентные параметры цепей при синусоидальных токах; методы анализа электрических цепей при установившемся синусоидальном токе; резонансные явления и частотные характеристики; анализ цепей при наличии взаимной индукции.

Описания работ содержат цель, программу, методические указания, контрольные вопросы, а также задания предварительных расчетов и исходные данные, ориентированные на техническую базу лаборатории ТОЭ кафедры теоретической и общей электротехники.

Данные указания отражают современный уровень и методическое обеспечение кафедры ТОЭ ДВГТУ, соответствуют фронтальному способу выполнения работ. Объем каждой работы ориентирован на 4-часовое занятие. Кроме того, они предусматривают предварительные расчеты, которые делают студенты в счет времени, отводимого на самостоятельную работу. Задания предварительных расчетов индивидуализированы как в отношении параметров электрических цепей, относящихся к разным стендам, так и в отношении условий задач, получаемых каждым студентом в бригаде. Методические указания содержат минимальный материал, необходимый для выполнения предварительных расчетов и экспериментальной части, что в значительной мере обусловлено возможностью предварять каждую лабораторную работу соответствующими лекционными занятиями. Вместе с тем студенты должны также пользоваться учебной литературой.

В указаниях обозначения электротехнических величин, а также термины и определения применяются согласно ГОСТам по электротехнике.

В обсуждении методических указаний участвовали преподаватели кафедры ТОЭ ДВГТУ. Авторы всем признательны за содействие.

ПРАВИЛА ВЫПОЛНЕНИЯ ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ

ОБЩИЕ УКАЗАНИЯ. К выполнению лабораторных работ допускаются студенты, знающие цель и программу работы, усвоившие теоретические положения, выполнившие предварительный расчет и имеющие заготовку отчета (схемы исследуемых электрических цепей, таблицы для занесения данных, предварительный расчет). Студенты–заочники допускаются к лабораторному практикуму при наличии зачтенных контрольных работ. Подготовка к лабораторной работе осуществляется во время самостоятельной работы вне лабораторных занятий.

Студенты, не выполнившие предварительных расчетов, не допускаются к выполнению лабораторной работы. К их числу преподаватель может отнести и таких студентов, расчеты которых выполнены неудовлетворительно. Студенту, сделавшему расчет с ошибкой, преподаватель может разрешить выполнять лабораторную работу с условием исправления расчётов и представления их на следующем занятии. Недопущенные к экспериментальной работе студенты должны заниматься теоретической подготовкой и расчетами во время, отведенное для лабораторной работы.

Студентам, не выполнившим в срок лабораторные работы, в ближайшую аттестацию ставится оценка "неудовлетворительно", и эта оценка не повышается до ликвидации задолженностей.

Пропущенная работа выполняется с разрешения деканата; порядок в каждом отдельном случае назначается преподавателем.

Лабораторные работы выполняются бригадой из двух или трёх студентов на одном стенде. Каждая бригада ведет дневник наблюдений (черновик), в который вносятся:

- 1) название работы и экспериментов;
- 2) результаты измерений по каждому эксперименту;
- 3) промежуточные расчеты, сделанные в ходе экспериментов;

4) графики требуемых зависимостей.

Дневник наблюдений после выполнения работы представляется преподавателю для визирования.

СБОРКА ЦЕПИ. При сборке цепи все коммутирующие устройства должны находиться в положении, обесточивающем стенд.

Сначала собираются элементы токовой (последовательной) цепи, образованной источниками питания, амперметрами, токовыми (последовательными) обмотками ваттметров и последовательно соединенными элементами цепи. Затем присоединяются вольтметры, обмотки напряжения ваттметров и другие параллельно соединенные элементы цепи. Подключать цепь к источнику питания можно только с разрешения преподавателя после проверки схемы.

ВЫПОЛНЕНИЕ ЭКСПЕРИМЕНТОВ. Эксперимент начинается с поверочного испытания цепи для выявления качественного характера исследуемого процесса. На этом этапе устанавливается правильность выбора измерительных приборов и параметров пассивных элементов (резисторов, катушек, конденсаторов). Также отмечаются пределы изменений измеряемых величин, планируется необходимое число точек измерений, выбирается диапазон измерений и масштаб для графиков. Пределы измеряемых величин необходимо выбирать так, чтобы стрелки приборов находились за сектором неопределенности шкалы.

После поверочных испытаний проводится исследование в соответствии с программой лабораторной работы. Измерения, отсчитываемые по приборам, записываются в черновик. Отсчет показаний всех приборов производится одновременно.

При выполнении измерений следует предварительно для каждого прибора определить цену деления как отношение установленного предела измеряемой величины к числу делений, а для ваттметра необходимо взять отношение произведения пределов по току и напряжению к числу делений.

При исследовании характеристик цепи, например, частотных, одновременно с фиксацией измеряемых величин каждую точку целесообразно наносить на график. Если кривая имеет точки экстремума, то их окрестность необходимо исследовать более подробно.

Разработку цепи и переход к выполнению следующего пункта программы производить с разрешения преподавателя. При этом следует продемонстрировать результаты опыта и соответствующие графики.

ОФОРМЛЕНИЕ ОТЧЕТА. Каждый студент составляет индивидуальный отчет по выполненной работе. В отчет входит следующее:

- 1) цель работы;
- 2) схемы исследуемых электрических цепей;
- 3) предварительный расчет, выполненный по индивидуальному заданию;
- 4) таблицы с измеренными и рассчитанными величинами;
- 5) формулы, по которым определялись рассчитанные величины;
- 6) графики, векторные диаграммы и прочие характеристики, построенные по результатам экспериментов или расчета;
- 7) краткое заключение по работе (сопоставление данных опытов и расчетов, объяснение полученных расхождений).

Отчеты должны выполняться аккуратно и компактно. Рекомендуется материал отчета располагать в последовательности, соответствующей программе работы.

Отчёт оформляется на листах формата А4 (237×210 мм). Первой страницей отчета является титульный лист.

Текст отчета пишется чернилами или шариковой ручкой. Схемы электрических цепей, графики, векторные диаграммы и т.п. выполняются, как правило, карандашом с применением чертежных инструментов.

Обозначения и размеры элементов цепи на схемах должны соответствовать ГОСТ. В письменных пояснениях к отчету, таблицах и выводах используются только общепринятые электротехнические обозначения,

термины, сокращения и т.д.

Результаты опытов и расчетов оформляются таблицами. Таблицам присваивается номер и название. Примеры оформления таблиц представлены ниже в описании программ конкретных работ. Каждая таблица сопровождается формулами, по которым определены расчетные данные.

Графики изображаются в прямоугольной системе координат на сетке (лучше на миллиметровой бумаге) размером не менее 15×15 сантиметров и по возможности различными цветами. На осях координат указывается равномерная цифровая разметка стандартного масштаба. При разметке число измерений в 1 см (или в одной клетке) должно быть равно 1, 2, 2.5, 4, 5 либо их дольним или кратным соотношениям: " $\times 10^n$ ", где n – целое положительное или отрицательное число. Обозначение оси абсцисс ставится в конце, параллельно оси; обозначение оси ординат – в конце, слева от нее. Ось обозначается символом величины и, через запятую, наименованием размерности. При наличии масштабной разметки стрелки на осях не ставят.

На графиках экспериментальных кривых необходимо наносить опытные точки отличительными символами для разных зависимостей (точки, крестики, треугольники и т.п.). Кривые проводятся в середине области большинства точек с учетом теоретического характера.

Допускается в одной и той же системе координат изображать различные кривые при построении нескольких осей. Масштабы в этом случае выбираются так, чтобы наибольшим значениям величин соответствовали по возможности одинаковые по длине отрезки. Величины, имеющие одинаковую масштабную разметку (или кратную и дольную 10), откладываются на одной оси ординат с общими цифрами разметки. Тогда символы и размерности разных величин пишут друг под другом с добавлением множителя " $\times 10^n$ " перед размерностью. Пример построения графиков приведен на рис.1.

Построение векторных диаграмм также выполняется в стандартном

масштабе, причем векторы одноименных величин имеют один масштаб. Масштабы величин указывают рядом с векторной диаграммой, пример – рис.2.3.

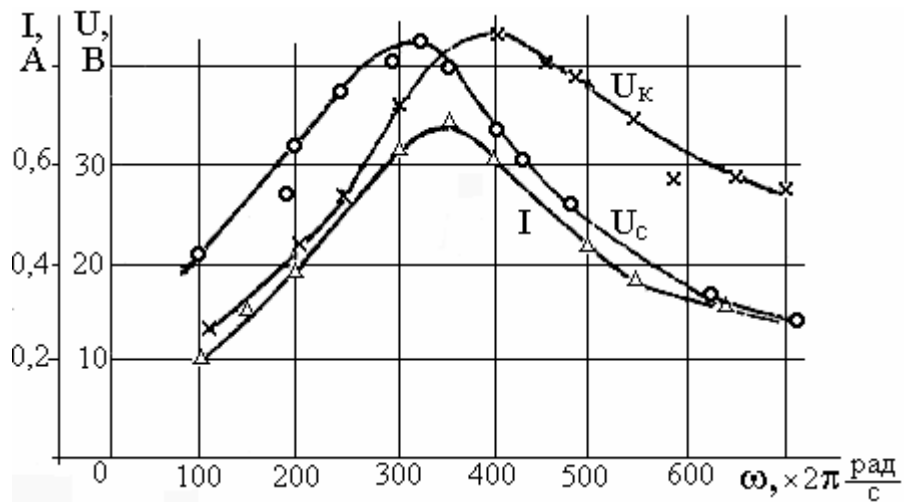


Рис.1. Пример построения графиков

ПРАВИЛА РАБОТЫ В ЛАБОРАТОРИИ. До начала работы на стендах студенты проходят инструктаж по технике безопасности и в последующем строго выполняют установленные правила;

1) студенты не должны вскрывать макеты, приборы и какую-либо аппаратуру, поскольку в них могут оказаться неизолированные участки с напряжением более 42 В;

2) включение цепи производить только после проверки ее преподавателем, при этом все регулирующие устройства должны быть поставлены в положения, дающие минимальные напряжения и токи в цепи;

3) в случае обнаружения неисправности студент обязан немедленно снять напряжение со стенда и сообщить об аварии преподавателю или лаборанту;

4) следует предупреждать всех работающих на стенде перед его включением;

5) нельзя касаться корпусов двух приборов одновременно и поэтому студенты должны научиться работать с аппаратурой одной рукой;

6) нельзя пользоваться неисправной аппаратурой, неизолированными проводниками или проводниками с нарушенной изоляцией;

7) нельзя включать под напряжение установку, если к ней подсоединен

провод, у которого один конец свободен;

8) недопустимо оставлять без надзора включенную под напряжение установку.

Несоблюдение правил техники безопасности опасно для жизни и может привести к несчастным случаям.

При поражении током необходимо оказать первую помощь пострадавшему; если произошло загорание аппаратуры – отключить напряжение сети использовать огнетушители и иные средства гашения огня.

Возможны случаи, когда несоблюдение правил эксплуатации аппаратуры не вызывает травм, но ведет к порче приборов. Например, не следует замыкать накоротко выводы источников питания, генераторов и подобных устройств или подключать к выводам резистор с малым сопротивлением.

При выполнении лабораторных работ необходимо соблюдать правила, направленные на повышение точности измерений.

Студенты, не выполняющие правила работы, лишаются права пользования лабораторией.

ЗАЩИТА ЛАБОРАТОРНЫХ РАБОТ. Зачет по лабораторному циклу студент получает по совокупности зачетов, предоставленных за каждую из выполненных работ.

Зачет по отдельной лабораторной работе студент получает при предъявлении отчета, соответствующего требованиям, в ходе собеседования по программе работы и ее теории. Примерный перечень контрольных вопросов приведен в конце описания каждой лабораторной работы. Защита студентом выполненной лабораторной работы при сдаче отчета проводится, как правило, в конце занятия.

Во время аттестации работа студентов в лаборатории оценивается следующим образом:

"отлично" – все работы по учебному плану на момент аттестации

выполнены и защищены;

"хорошо" – все работы выполнены, защищены частично;

"удовлетворительно" – все работы выполнены;

"неудовлетворительно" – не выполнена хотя бы одна работа на момент аттестации;

"не аттестовано" – студент отсутствовал на лабораторных занятиях.

ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОГО СТЕНДА

Для выполнения лабораторных работ используется универсальный стенд, приспособленный для трех частей курса ТОЭ. Схема расположения основных панелей и приборов этого стенда приведена на рис.2. В их состав входят:

- 1 – панель щитовых измерительных приборов (амперметры и вольтметры);
- 2 – генератор сигналов регулируемой частоты (синусоидальной и прямоугольной формы);
- 3 – электронный вольтметр;
- 4 – осциллограф;
- 5 – панель моделей для полевых задач;
- 6 – панель нелинейных элементов;
- 7 – панель выводов источников питания;
- 8 – панель линейных двухполюсников.

На рис.3 приведена схема панели №8, на которой представлены выводы набираемых элементов R , L , C и даны соответствующие номиналы. Сопротивления резисторов регулируются с помощью декадных тумблеров с шагом 15, 20, 25 и 50 Ом; индуктивные катушки имеют номиналы индуктивностей порядка 4, 26, 46 мГн, причем пара индуктивностей связана взаимной индуктивностью порядка 18 мГн. Номиналы активного сопротивления индуктивных катушек на панели не приведены.

На панели представлены выводы двух емкостных батарей. В каждой батарее емкость регулируется включением отдельных ячеек по схеме параллельного соединения.

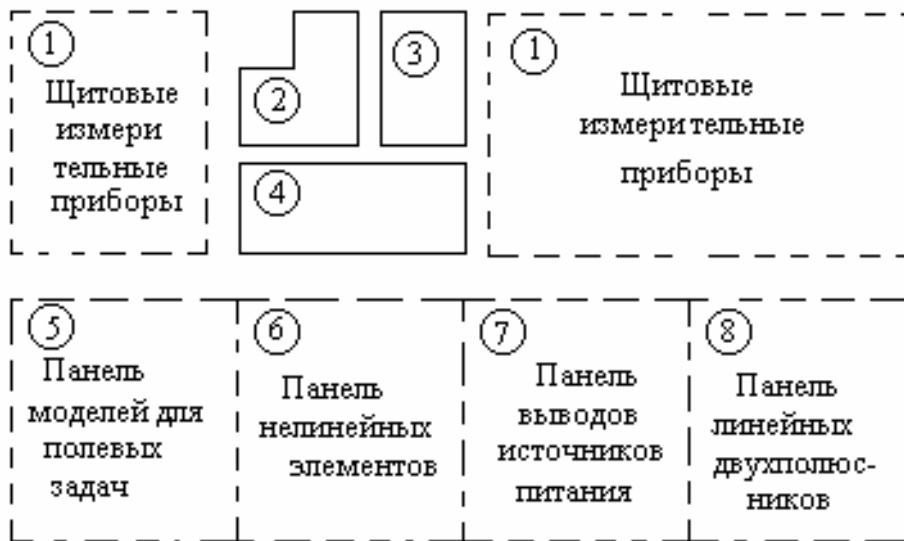


Рис.2. Схема расположения панелей и приборов универсального стенда по ТОЭ

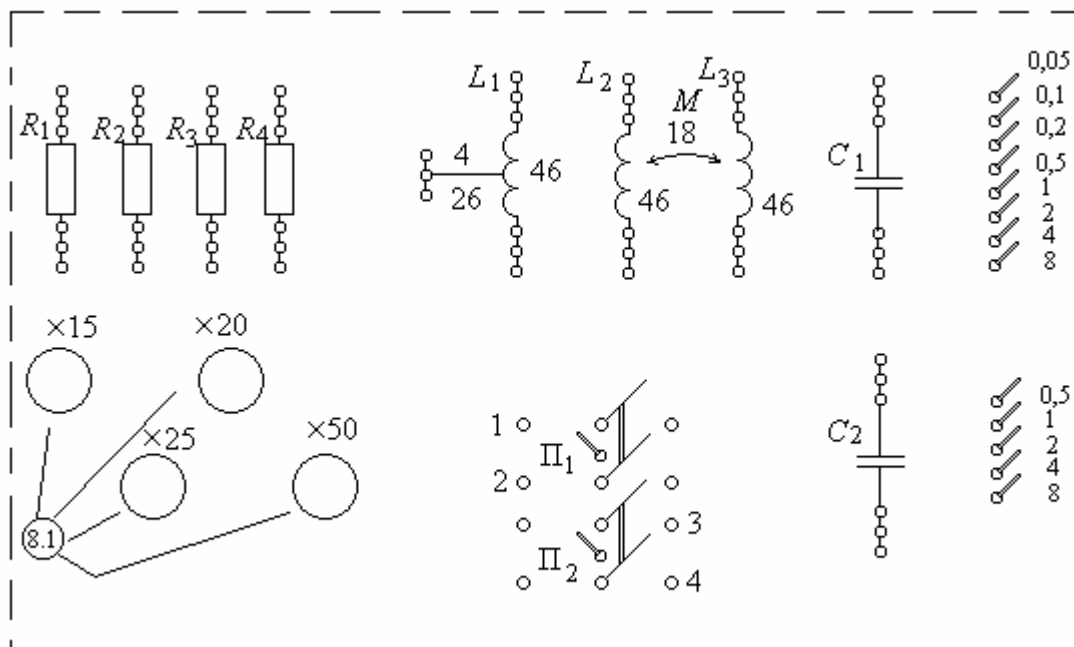


Рис.3. План расположения элементов на панели №8:

8.1 – декадные тумблеры набора сопротивлений

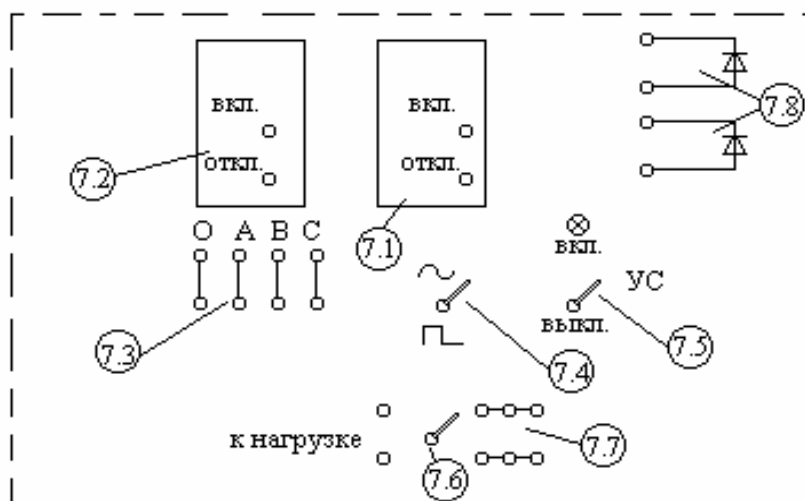


Рис.4. План панели №7:

- 7.1 – автоматический переключатель, подающий однофазное питание на стенд;
 7.2 – автоматический переключатель, подающий трехфазное питание на стенд;
 7.3 – выводы источника трехфазного питания; 7.4 – тумблер переключения формы сигнала источника: \sim – синусоидальный, \square – прямоугольный; 7.5 – тумблер включения усилителя; 7.6 – тумблер, регулирующий подачу питания к выходным гнездам источника; 7.7 – выходные гнезда источника; 7.8 – выводы диодов

На рис.4 выполнен план панели № 7, на которой представлены автоматические переключатели подаваемого на стенд питания, выводы питания и соответствующие тумблеры.

Порядок подачи на стенд и исследуемую схему однофазного питания состоит в следующем:

- автоматический переключатель 7.1 на панели 7 (рис.4) поставить в положение "ВКЛ";
- установить заданную частоту генератора (прибор 2 в схеме на рис.2);
- включить питание генератора и усилителя (положение "ВКЛ" для тумблера 7.5, показанного на рис.4);
- установить тумблер формы сигнала генератора в положение " \sim " или " \square ", а также в соответствующее положение тумблер 7.4 на панели 7;
- установить в верхнее положение тумблер 7.6 на панели 7,

регулирующий подачу питания на исследуемую схему, подключенную к зажимам 7.7 той же панели;

– величина подаваемого напряжения устанавливается регулятором генератора сигналов (прибор 2 на рис.2);

– для снятия напряжения со схемы тумблер 7.6 поставить в нижнее положение, а для снятия напряжения со стенда поставить автоматический переключатель 7.1 в положение "ОТКЛ".

Порядок подачи на стенд и исследуемую схему трехфазного питания:

– подключить исследуемую схему через гнезда 7.3 панели 7;

– автоматический переключатель 7.2 на панели 7 поставить в положение "ВКЛ";

– для снятия напряжения автоматический переключатель 7.2 на панели 7 поставить в положение "ОТКЛ".

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПАССИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ

Цель работы – знакомство с оборудованием лаборатории, определение параметров элементов схем по результатам измерений в цепи с установившимся синусоидальным током.

Программа работы

В схеме рис.1.1 выполнить измерения тока, напряжения и мощности, поочередно присоединяя к зажимам 2–2' простейшие двухполюсники:

а) – резистор; б) – индуктивную катушку; в) – конденсатор.

Результаты измерений внести в табл.1.1. Номиналы параметров двухполюсников (R , L , C) и частоту f установить в соответствии с табл.1.2 при напряжении $U=30$ В и $R_0=0$.

По результатам измерений определить параметры, выделенные в табл.1.1 в качестве расчетных.

Установить $R_0 = 10$ или 15 Ом. Снять осциллограммы $i(t)$ и $u(t)$, используя выводы, указанные на рис.1.1 стрелками.

Построить с соблюдением масштабов векторные диаграммы для каждой из рассмотренных электрических цепей рис.1.1.

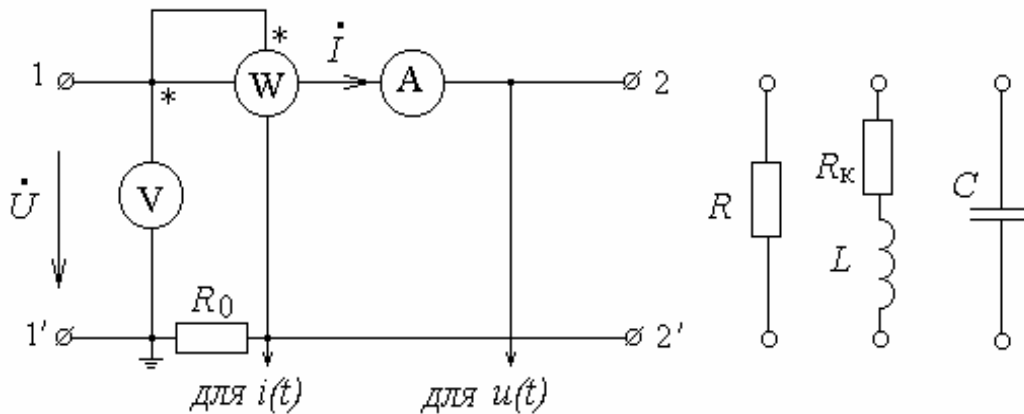


Рис.1.1. Схема к определению параметров элементов в электрической цепи

Таблица 1.1

Результаты измерений и расчетов схемы рис.1.1

Элемент цепи	Измерения				Расчетные параметры							
	f	U	I	P	Z	R	X	$\cos j$	j	R_k	L	C
	Гц	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	–	град	Ом	мГн	мкФ
Резистор										–	–	–
Катушка												–
Конденсатор										–	–	

Таблица 1.2

Исходные данные

Стенд	f	R	L	C
	Гц	Ом	мГн	мкФ
1	200	40	45	19,0
2	250	60	24	16,0
3	300	40	35	13,0
4	350	40	25	11,5
5	250	40	46	15,5
6	200	40	47	19,5
7	220	40	44	18,0
8	350	50	23	12,0
9	200	40	45	20,0
10	350	50	22	11,0

Методические указания

Параметры пассивных элементов цепи синусоидального тока и напряжения (рис.1.1) определяются по следующим соотношениям:

$$Z = \frac{U}{I}, \quad R = \frac{P}{I^2}, \quad X = \pm \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad j = \pm \arccos\left(\frac{P}{UI}\right),$$

где Z – полное сопротивление;

R – активное сопротивление;

X – реактивное сопротивление (X_L – индуктивное, X_C – емкостное, у резистора реактивное сопротивление равно нулю);

j – угол разности (сдвига) фаз напряжения и тока: для индуктивной катушки $j > 0$ (напряжение опережает ток), для конденсатора $j < 0$ (ток опережает напряжение);

U – действующее напряжение;

I – действующий ток;

P – активная мощность.

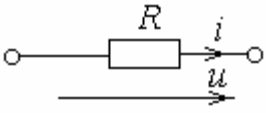
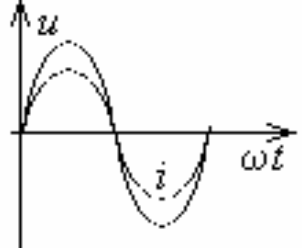
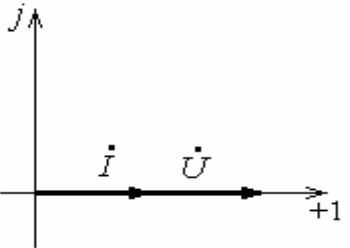
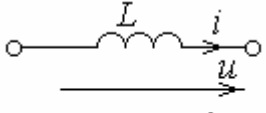
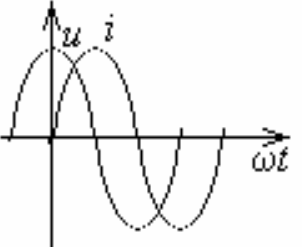
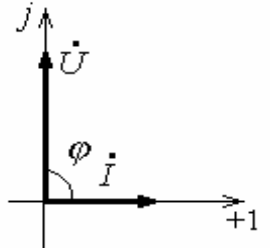
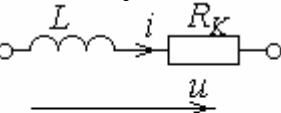
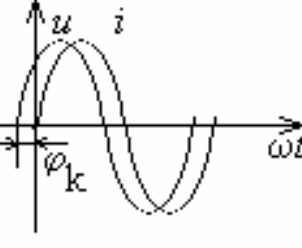
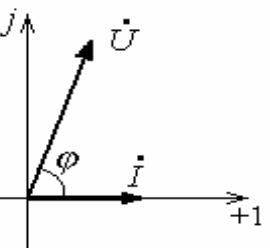
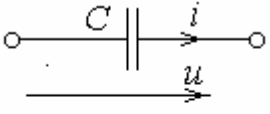
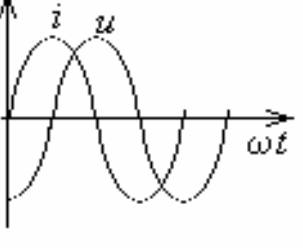
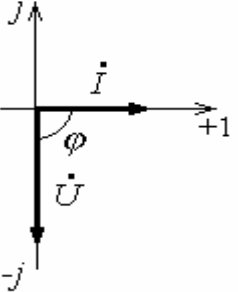
В схеме электрической цепи с индуктивной катушкой (рис.1.1,б) приведены два элемента: индуктивность L и сопротивление R_K . Последнее обусловлено мощностью, идущей на нагревание проводников, из которых изготовлена катушка. Схема с конденсатором (рис.1.1,в) не содержит активного сопротивления, т.к. потери в нем практически равны нулю.

Индуктивность L и емкость C соответствующих элементов цепи вычисляются из выражений для реактивных сопротивлений:

$$X_L = \omega L, \quad X_C = \frac{1}{\omega C},$$

причем угловая частота ω связана с частотой приложенного напряжения f по формуле $\omega = 2\pi f$.

Соотношения между токами и напряжениями для элементов цепи

Элемент цепи	Ток и напряжение	Векторная диаграмма
<p>Резистор</p>  $u = Ri$	 $u(t) = U_m \sin \omega t$ $i(t) = I_m \sin \omega t$	$\dot{U} = U e^{j0^\circ} \quad \dot{I} = I e^{j0^\circ}$ 
<p>Индуктивность (идеальная)</p>  $u = L \frac{di}{dt}$	 $i(t) = I_m \sin \omega t$ $u(t) = U_m \sin(\omega t + 90^\circ)$	$\dot{U} = U e^{j90^\circ}$ $\dot{I} = I e^{j0^\circ}$ 
<p>Индуктивная катушка</p>  $u = L \frac{di}{dt} + R_K i$	 $i(t) = I_m \sin \omega t$ $u(t) = U_m \sin(\omega t + \varphi_K)$	$\dot{U} = U e^{j\varphi_K}$ $\dot{I} = I e^{j0^\circ}$ 
<p>Конденсатор</p>  $u = \frac{1}{C} \int_{-\infty}^t i dt$	 $i(t) = I_m \sin \omega t$ $u(t) = U_m \sin(\omega t - 90^\circ)$	$\dot{U} = U e^{-j90^\circ}$ $\dot{I} = I e^{j0^\circ}$ 

Синусоидальные токи и напряжения принято изображать комплексными величинами. Например, ток $i(t)=I_m\sin(\omega t+\varphi_i)$ имеет изображение $\underline{I}=Ie^{j\varphi_i}$ (комплексный действующий ток), где $I=I_m/\sqrt{2}$; напряжение $u(t)=U_m\sin(\omega t+\varphi_u)$ имеет изображение $\underline{U}=Ue^{j\varphi_u}$ (комплексное действующее напряжение), где $U=U_m/\sqrt{2}$. В свою очередь, комплексные величины удобно представлять векторами на комплексной плоскости. Совокупность векторов, изображающих синусоидальные токи и напряжения электрической цепи, называется векторной диаграммой. Примеры построения векторных диаграмм простейших электрических цепей представлены в табл.1.3.

Теоретические сведения к работе приводятся в учебной литературе: [1, §4–1 ... §4–10]; [2, § 2–1 ... §2–10, §3–1]; [3, §3–1 ... §3–9]; а также [4, 5, 6, 7].

Контрольные вопросы

1. Дайте определение идеализированных элементов электрической схемы R, L, C .
2. Какие явления, происходящие в цепи переменного тока, отражаются в ее схеме активным сопротивлением, индуктивностью и емкостью?
3. Запишите численное выражение мгновенного тока в опыте с индуктивной катушкой, приняв начальную фазу напряжения равной 30° .
4. В опыте с индуктивной катушкой последняя представлена в виде схемы, состоящей из двух последовательно соединенных идеальных элементов: L и R_k . Что они моделируют? В каком случае потребовалось бы ввести еще и C ?
5. В опыте с конденсатором последний представлен только лишь одним идеализированным элементом – емкостью. Почему?
6. С какой частотой изменяются мгновенные значения мощности?
7. Могут ли быть отрицательными мгновенные значения мощности? Дайте толкование этому факту.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2

ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЕ И ПАРАЛЛЕЛЬНОЕ СОЕДИНЕНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Цель работы – экспериментальное изучение основных соотношений в линейных электрических цепях переменного тока при последовательном и параллельном соединениях резистора, индуктивной катушки, конденсатора.

Программа работы

В электрической цепи с последовательно соединенными резистором, индуктивной катушкой и конденсатором, схема которой приведена на рис.2.1, измерить значения действующих тока и напряжения на участках цепи, а также активную мощность. Полученные данные внести в табл.2.1. Экспериментально определить знак угла φ .

По данным измерений вычислить параметры Z , R , X , φ . Сравнить результаты опыта с расчетными. Обратить внимание на то, что арифметическая сумма действующих напряжений U_R, U_K, U_C не равна входному напряжению U .

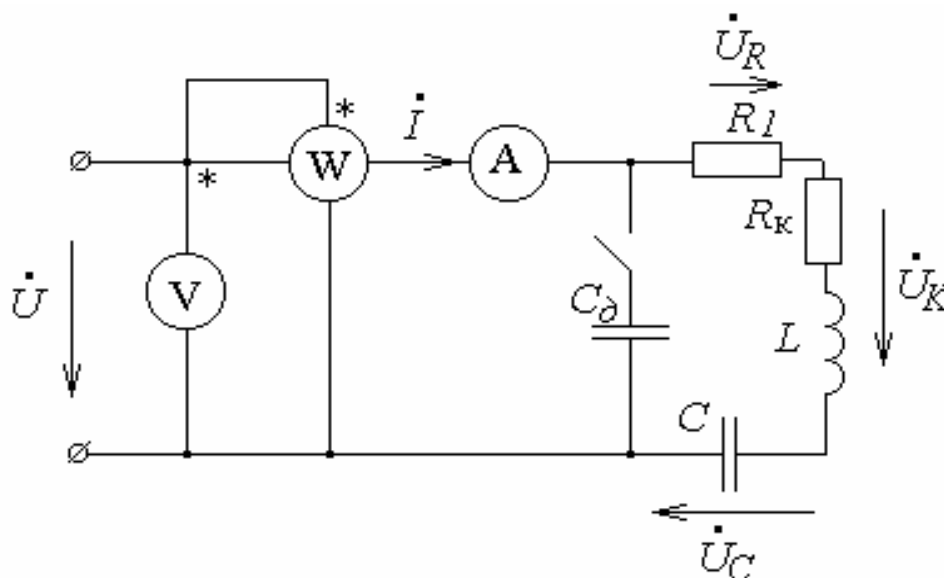


Рис.2.1. Схема последовательного соединения элементов электрической цепи

Таблица 2.1

Данные исследования последовательного соединения элементов при
 $R_I = \dots \text{Ом}, L = \dots \text{мГн}, C = \dots \text{мкФ}, f = \dots \text{Гц}$

Способ получения данных	U	I	P	U_R	U_K	U_C	$\pm j$	Z	R	X
	B	A	$Вт$	B	B	B	$град$	$Ом$	$Ом$	$Ом$
Расчет										
Опыт										

Те же элементы электрической цепи соединить параллельно (рис.2.2). Выполнить измерения величин действующих напряжения и токов, а также активной мощности. Полученные данные внести в табл.2.2. Экспериментально определить знак угла j . По данным измерений вычислить параметры цепи Y, G, B, j . Обратит внимание на то, что арифметическая сумма токов I_R, I_K, I_C не равна входному току I .

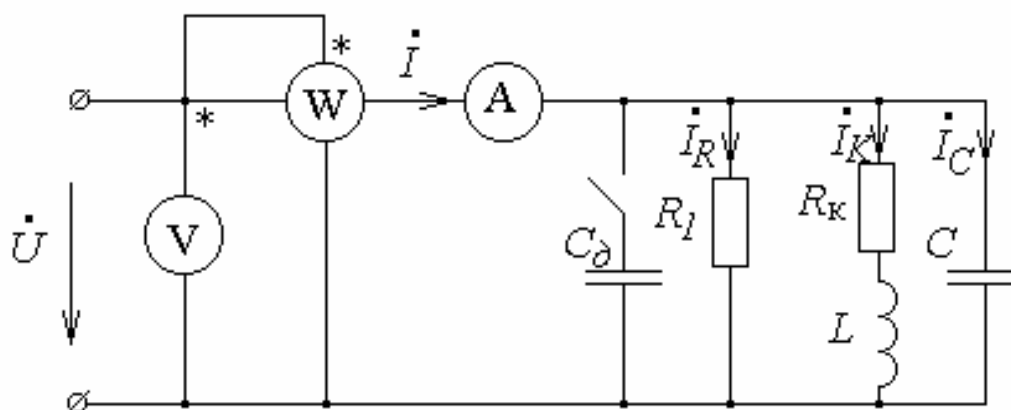


Рис.2.2. Схема параллельного соединения элементов электрической цепи

Таблица.2.2

Данные исследования параллельного соединения элементов
при $R_I = \dots \text{Ом}, L = \dots \text{мГн}, C = \dots \text{мкФ}, f = \dots \text{Гц}$

Способ получения данных	U	I	P	I_R	I_K	I_C	$\pm j$	Y	G	B
	B	A	$Вт$	A	A	A	$град$	$1/Ом$	$1/Ом$	$1/Ом$
Расчет										
Опыт										

Расчет										
Опыт										

УКАЗАНИЯ. 1. Величину входного напряжения в эксперименте задать равной значению, полученному при предварительных расчетах, частота f указана в табл.2.3.

2. Емкость C_δ ($C_\delta = 0,1 \text{ мкФ}$) используется для определения знака угла j . Угол j положителен (цепь имеет индуктивный характер), если при подключении емкости C_δ ток I уменьшается. Угол j отрицателен (цепь имеет емкостный характер), если при подключении емкости C_δ ток I увеличивается.

Предварительный расчет

В схеме рис.2.1 известны параметры $R_K=8 \text{ Ом}$, R_L , L , C , f и задано напряжение: либо U_R (вариант 1), либо U_C (вариант 2), либо U_K (вариант 3) – табл.2.3.

Таблица 2.3

Исходные данные

Стенд	f Гц	R_L Ом	L мГн	C мкФ	Вариант 1		Вариант 2		Вариант 3	
					U_R	I_K	U_C	I_R	U_K	I_C
					В	А	В	А	В	А
1	200	40	45	7,0	16,0	0,53	45,5	0,75	22,9	0,26
2	250	60	24	8,5	25,5	0,78	31,8	0,50	16,4	0,40
3	300	40	35	4,0	15,4	0,45	51,2	0,75	25,6	0,23
4	350	40	26	4,0	16,0	0,52	45,5	0,75	23,1	0,26
5	250	40	46	4,5	14,4	0,41	50,9	0,75	26,2	0,21
6	200	40	47	6,5	16,0	0,50	49,0	0,75	23,9	0,25
7	220	40	44	6,0	16,7	0,49	50,3	0,75	25,6	0,25
8	350	50	23	4,5	21,1	0,59	42,7	0,60	21,6	0,30
9	200	40	44	5,5	14,2	0,42	51,4	0,75	25,2	0,21
10	350	50	22	4,5	21,1	0,61	42,7	0,60	20,7	0,30

Определить все величины, содержащиеся в табл.2.1, заполнив в ней строку "расчет".

Построить в масштабе векторную диаграмму напряжений, используя

данные расчета.

В схеме рис.2.2 известны параметры $R_K=8 \text{ Ом}$, R_l , L , C , f и задан ток: либо I_K (вариант 1), либо I_R (вариант 2), либо I_C (вариант 3) – табл.2.3.

Определить все величины, содержащиеся в табл.2.2, заполнив в ней строку "расчет".

Построить в масштабе векторную диаграмму токов, используя данные расчета.

Методические указания

Применительно к схеме рис.2.1 второй закон Кирхгофа для комплексных напряжений записывается следующим образом:

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

Действующие напряжения участков схемы рис.2.1 определяются по закону Ома:

$$U_R = R_l I, \quad U_K = Z_K I, \quad U_C = X_C I.$$

Соответственно, векторная диаграмма для схемы рис.2.1, при условии, что $j < 0$ ($U_C > U_K$) и начальная фаза тока равна 0, будет выглядеть так, как показано на рис.2.3,а.

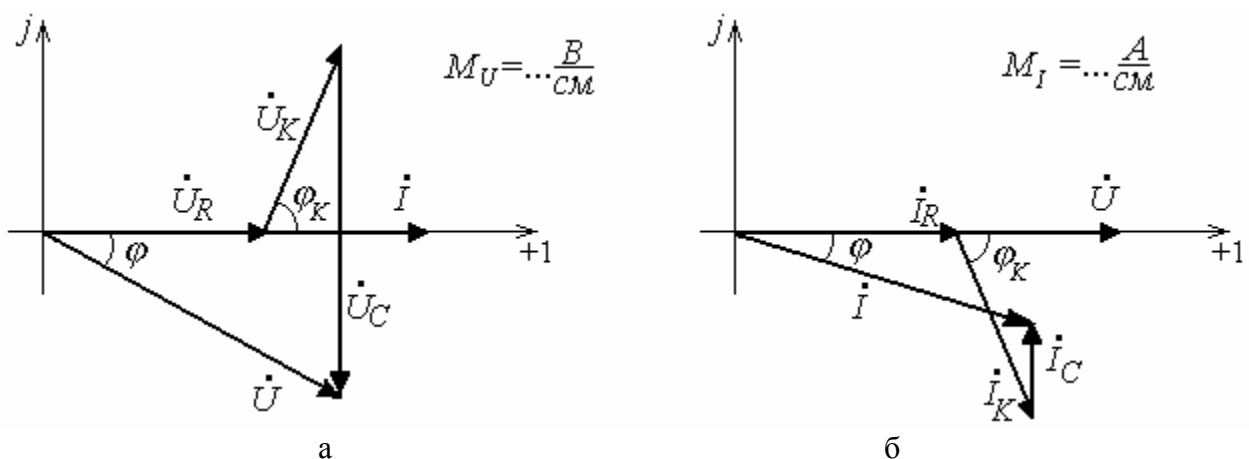


Рис.2.3. Векторные диаграммы:

- а– для схемы с последовательным соединением элементов электрической цепи;
- б– для схемы с параллельным соединением элементов электрической цепи

Из формулы (2.1) следует, что комплексное сопротивление цепи

определяется выражением

$$\underline{Z} = \underline{Z}_R + \underline{Z}_K + \underline{Z}_C = R_1 + (R_K + j X_L) - j X_C.$$

С другой стороны, формально имеем

$$\underline{Z} = \underline{Z} e^{j\varphi} = R + j X = (R_1 + R_K) + j (X_L - X_C),$$

где Z , R , X – полное, активное и реактивное сопротивления цепи соответственно;

φ – угол сдвига фаз.

Опытным путем, когда известны ток I , приложенное напряжение U , потребляемая мощность P , эквивалентные параметры цепи вычисляются как

$$Z = \frac{U}{I}, \quad R = \frac{P}{I^2}, \quad X = \pm \sqrt{Z^2 - R^2}, \quad \varphi = \pm \arccos\left(\frac{P}{UI}\right).$$

Знаки величин X и φ определяются характером цепи; знак "+" соответствует индуктивному характеру цепи ($X_L > X_C$, $U_K > U_C$).

Применительно к схеме рис.2.2 первый закон Кирхгофа для комплексных токов записывается следующим образом:

$$\underline{I} = \underline{I}_R + \underline{I}_K + \underline{I}_C.$$

Действующие токи отдельных ветвей схемы рис.2.2 определяются из выражений:

$$I_R = U/R_1, \quad I_K = U/Z_K, \quad I_C = U/X_C.$$

Векторная диаграмма для схемы рис.2.2 при условии, что ($I_C < I_K$) и начальная фаза приложенного напряжения равна 0, выглядит так, как показано на рис.2.3,б.

При параллельном соединении участков электрической цепи синусоидального тока (рис.2.2) цепь принято характеризовать комплексными проводимостями ее участков:

$$\underline{Y} = \underline{Y}_R + \underline{Y}_K + \underline{Y}_C = \frac{1}{R_1} + \left(\frac{R_K}{Z_K^2} - j \frac{X_L}{Z_K^2} \right) + j \frac{1}{X_C}.$$

Также справедливо:

$$\underline{Y} = Y e^{-ij} = G - jB = (G_I + G_K) - j(B_L - B_C),$$

$$\text{где } G_I = 1/R_1, \quad G_K = R_K/Z_K^2, \quad B_L = X_L/Z_K^2, \quad B_C = 1/X_C.$$

В том случае, когда параметры цепи Y , G , B требуется найти по экспериментальным данным, можно воспользоваться формулами

$$Y = \frac{I}{U}, \quad G = \frac{P}{U^2}, \quad B = \pm \sqrt{Y^2 - G^2}, \quad j = \pm \arccos\left(\frac{P}{UI}\right).$$

Величина B и j имеют знак "+" при индуктивном характере цепи ($B_L > B_C$, $I_L > I_C$).

Теоретические сведения к работе содержатся в учебной литературе: [1, §4–4, §5–6]; [2, §3–2, §3–3, §3–4]; [3, §3–11 ... §3–16]; а также [4, 5, 6, 7].

Контрольные вопросы

1. Чем объяснить тот факт, что в цепи переменного тока сумма действующих значений напряжения на участках цепи, включенных последовательно, может быть больше напряжения на зажимах всей цепи, содержащей эти участки? Чем объяснить то же соотношение для суммы действующих значений токов в параллельно включенных ветвях по сравнению с током в неразветвленной части цепи?

2. Какие существуют соотношения, связывающие параметры Z , R , X и Y , G , B ?

3. Предложите и теоретически обоснуйте способ экспериментального определения знака угла сдвига фаз между током и напряжением пассивного двухполюсника.

4. В каких пределах может изменяться угол сдвига фаз между током и

напряжением в электрической цепи?

5. Составьте интегрально-дифференциальные уравнения, описывающие режим работы схем, представленных на рис.2.1 и рис.2.2.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3

ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Цель работы – экспериментальное определение параметров и построение векторных диаграмм разветвленных цепей переменного тока.

Программа работы

Выполнить исследование цепи синусоидального тока, схема которого представлена на рис.3.1, а комплексные сопротивления \underline{Z}_1 , \underline{Z}_2 , \underline{Z}_3 заданы выражениями в табл.3.1. Измерить активную мощность P , действующие токи I_1 , I_2 , I_3 и напряжения U , U_1 , U_{23} . Показания приборов внести в табл.3.2.

Экспериментально определить знак угла φ . По результатам измерений рассчитать эквивалентные параметры цепей Z , R , X , φ .

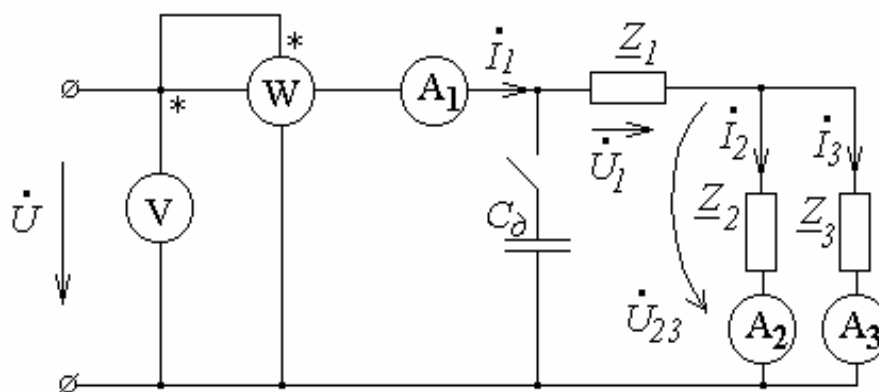


Рис.3.1. Схема исследуемой электрической цепи

Таблица 3.1

Комплексное сопротивление ветвей схемы рис.3.1

Вариант	\underline{Z}_1	\underline{Z}_2	\underline{Z}_3
1	$R_K + j\omega L$	R_2	$R_1 - j\frac{1}{\omega C}$
2	$-j\frac{1}{\omega C}$	R_2	$R_1 + R_K + j\omega L$

3	R_1	$R_2 + R_K + j\omega L$	$-j \frac{1}{\omega C}$
----------	-------	-------------------------	-------------------------

УКАЗАНИЕ. Установить входное напряжение $U=30 В$ при частоте f (табл.3.4). Параметры элементов R_1, R_2, L, C задать равными значениям, полученным в предварительном расчете.

Таблица 3.2

Данные исследования схемы рис.3.1 при $f = \dots Гц$,
 $R_1 = \dots Ом, R_2 = \dots Ом, L = \dots мГн, C = \dots мкФ$

Способ получения данных	U	U_{12}	U_{23}	I_1	I_2	I_3	P	$\pm j$	Z	R	X
			В	В	А	А	А	Вт	град	Ом	Ом
Расчет											
Опыт											

В исследуемой цепи измерить разности фаз: для тока \dot{I}_1 и напряжения \dot{U}_1 (схема – рис.3.2,а); для тока \dot{I}_1 и напряжения \dot{U}_{23} (схема – рис.3.2,б); для тока \dot{I}_1 и напряжения \dot{U}_{R2} (схему составить самостоятельно). Результаты свести в табл.3.3. Сравнить разности фаз со значениями углов на векторных диаграммах.

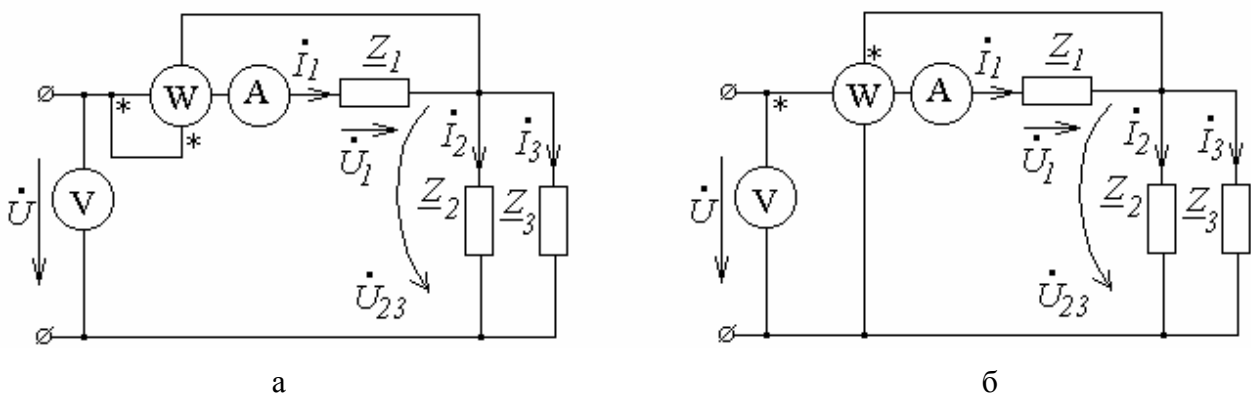


Рис.3.2. Схемы к определению угла сдвига фаз:

а–между \dot{I}_1 и \dot{U}_1 ; б–между \dot{I}_1 и \dot{U}_{23}

УКАЗАНИЕ. Показание ваттметра равно величине $P_W = U_W I_W \cos j$, где U_W – действующее напряжение в параллельной цепи прибора, I_W – действующий ток в его последовательной цепи, j – угол сдвига фаз между ними. В общем случае эти величины (U_W, I_W) могут быть ассоциированы с разными участками цепи. Если U_W, I_W измерены, то ваттметр может быть использован для

определения угла j :

$$|j| = \arccos\left(\frac{P}{U_W I_W}\right).$$

Таблица 3.3

Данные для определения угла сдвига фаз

Ток и напряжение	P_W	U_W	I_W	$ j $
	<i>Вт</i>	<i>В</i>	<i>А</i>	<i>Град</i>
I_1, U_1				
I_1, U_{23}				
I_1, U_{R2}				

Предварительный расчет

Изобразить схему исследуемой электрической цепи, собрав ветви в схеме рис.3.1 из резисторов R_1, R_2 , индуктивной катушки (R_K, L) и конденсатора C с учетом заданных комплексных сопротивлений $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ (табл.3.4).

Для исследуемой электрической цепи построить векторную диаграмму, если известно, что $U = 30 \text{ В}$, $R_K = 8 \text{ Ом}$, а токи, напряжения и угол j заданы в соответствии с вариантом (табл.3.4).

По результатам построения векторной диаграммы и заданному в табл.3.4 значению частоты f определить параметры элементов R_1, R_2, L, C .

Определить эквивалентные параметры цепи Z, R, X, j .

Данные расчетов свести в табл.3.2.

Таблица 3.4

Исходные данные

Стен д	f	Вариант 1				Вариант 2				Вариант 3				j <i>Град</i>
		U_1	U_{23}	I_1	I_3	U_{23}	I_1	I_2	I_3	I_1	I_2	I_3	I_1	
		<i>В</i>	<i>В</i>	<i>А</i>	<i>А</i>	<i>В</i>	<i>А</i>	<i>А</i>	<i>А</i>	<i>А</i>	<i>А</i>	<i>А</i>	<i>А</i>	
1	200	26,3	25,8	0,46	0,29	24,1	0,45	0,20	0,27	22,6	0,14	0,29	0,34	
2	250	25,4	24,1	0,66	0,41	24,6	0,67	0,31	0,41	24,1	0,20	0,45	0,34	

3	00	8,6	2,9	,43	,27	7,4	,48	,23	,29	,28	,13	,32	34
4	50	6,5	5,5	,46	,29	4,5	,45	,20	,28	,27	,14	,29	34
5	50	8,3	3,3	,39	,25	8,0	,43	,20	,26	,26	,11	,28	34
6	00	6,8	4,6	,45	,29	5,8	,47	,21	,29	,28	,13	,31	34
7	20	7,6	4,1	,45	,20	6,3	,47	,22	,29	,28	,13	,31	34
8	50	7,1	3,7	,53	,33	6,1	,56	,26	,34	,34	,16	,37	34
9	00	7,6	4,0	,39	,25	7,1	,42	,19	,26	,25	,11	,28	34
10	50	6,6	4,2	,54	,34	5,7	,56	,26	,34	,27	,16	,34	34

Методические указания

В основу геометрических построений, необходимых при выполнении предварительных расчетов, положены законы Кирхгофа в комплексной форме:

$$\sum_K \dot{I}_K = 0, \quad \sum_K \dot{U}_K = 0.$$

Для исследуемой цепи (рис.3.1) независимые уравнения, составленные по первому и второму законам Кирхгофа, имеют вид

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0, \quad \dot{U} - \dot{U}_1 - \dot{U}_{23} = 0$$

или

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2 + \dot{I}_3, \quad \dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_{23}.$$

Относительная простота этих уравнений позволяет применить для расчета указанных схем правила геометрических построений, например, построение треугольников по длине заданных его сторон или длине двух его сторон и направлению третьей. Покажем это на примере схемы рис.3.3. Пусть заданы величины действующих токов I_1, I_2 , напряжений U_1, U_{23} . Кроме того, известен угол $j_2 = \arctg \frac{X_C}{R}$, равный сдвигу фаз между током \dot{I}_2 и напряжением \dot{U}_{23} .

Построение целесообразно осуществить в следующем порядке.

Откладываем вектор \dot{U}_{23} в масштабе для напряжений, задав ему произвольное направление на комплексной плоскости. В иллюстрационном

примере вектор \dot{U}_{23} совмещен с осью "+1": $\dot{U}_{23} = U_{23} e^{j0^\circ}$. Другими словами, начало отсчета времени всех рассматриваемых в примере синусоидальных токов и напряжений совмещено с моментом, когда напряжение $u_{23}(t)$ равно нулю, переходя от отрицательных значений к положительным.

Комплексный ток \dot{I}_2 в ветви, содержащей емкость, опережает комплексное напряжение на угол j_2 . Выберем масштаб токов и построим \dot{I}_2 , в сторону против движения часовой стрелки.

Построим векторы \dot{I}_1 и \dot{I}_3 , причем о комплексном токе \dot{I}_3 (ток в индуктивности) известно, что он отстает от напряжения на 90° ; известен также модуль (действующее значение) комплексного тока \dot{I}_1 . Примем во внимание, что векторы \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_3 , в силу уравнения, связывающего их по 1-му закону Кирхгофа, должны образовать треугольник. Его построение показано на диаграмме.

Построим вектор напряжения \dot{U}_1 , учитывая, что ток и напряжение в сопротивлении R_1 совпадают по направлению.

Исходя из того, что $\dot{U} = \dot{U}_1 + \dot{U}_{23}$, и выполнив геометрическое сложение \dot{U}_1 и \dot{U}_{23} , получим \dot{U} . Теперь представляется возможность записать все комплексные величины: \dot{I}_1 , \dot{I}_2 , \dot{I}_3 , \dot{U}_1 , \dot{U}_{23} , \dot{U} , вычислить эквивалентные (полное, активное и реактивное) сопротивления цепи.

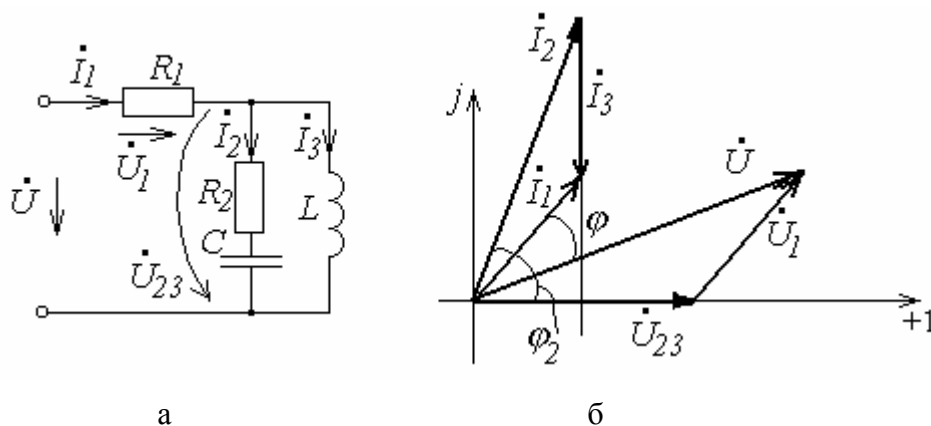


Рис.3.3. Построение векторной диаграммы для схемы со смешанным соединением элементов:

а–схема электрической цепи; б–векторная диаграмма

Прежде чем строить векторную диаграмму в масштабе, целесообразно построить ее качественно (имеется в виду, что должны быть соблюдены угловые соотношения между токами и напряжениями на отдельных элементах).

Теоретические сведения к работе приводятся в учебной литературе:[1, §2–7, §2–8, §4–4, §4–8]; [2, §3–1 ... §3–4]; [3, §3–4, §3–5, §3–11]; а также [4, 5, 6, 7].

Контрольные вопросы

1. Запишите интегрально-дифференциальные уравнения, а также уравнения в комплексной форме для исследуемых схем.
2. Объясните способ измерения разности начальных фаз напряжения и тока с помощью ваттметра.
3. Запишите аналитическое выражение в числах мгновенного напряжения $u_{23}(t)$, используя результаты эксперимента и векторной диаграммы.
4. Дайте определение коэффициента мощности двухполюсника.
5. Известно, что коэффициент мощности некоторого пассивного двухполюсника меньше единицы. Предложите способы его повышения. Рассмотрите два случая: $j < 0, j > 0$.
6. При повышении коэффициента мощности (компенсации сдвига фаз) будут ли изменяться показания ваттметра?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ

Цель работы – опытная проверка принципов наложения и взаимности, а также теоремы об эквивалентном источнике напряжения в разветвленной электрической цепи синусоидального тока.

Программа работы

Собрать электрическую цепь, схема которой изображена на рис.4.1,а. Провести эксперимент по проверке принципа наложения. Для этого в исследуемую цепь сначала подать только напряжение U_1 (схема – рис.4.1,б), затем – только напряжение U_2 (схема – рис.4.1,в), наконец, включить оба источника одновременно (схема – рис.4.1,г). Измерить токи в ветвях. Результаты измерений внести в табл.4.1.

Проверить теорему об эквивалентном источнике напряжения следующим образом.

Измерив напряжения и токи на участках цепи с сопротивлениями $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ (одна из схем рис.4.1,б,в,г), определить сопротивления этих ветвей. Результаты записать в табл.4.2.

В схеме с двумя источниками напряжения разорвать поочередно каждую из ветвей и измерить соответствующие напряжения холостого хода U_{01}, U_{02}, U_{03} (схемы изображены на рис.4.2,а, б, в). Результаты измерений внести в табл.4.2.

Используя значения сопротивлений $\underline{Z}_1, \underline{Z}_2, \underline{Z}_3$ полученных по данным измерений (табл.4.2), рассчитать сопротивления эквивалентных источников:

$$\underline{Z}_{\mathcal{E}1} = \frac{\underline{Z}_2 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3}, \underline{Z}_{\mathcal{E}2} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_3}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_3}, \underline{Z}_{\mathcal{E}3} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}.$$

Результаты занести в табл.4.2.

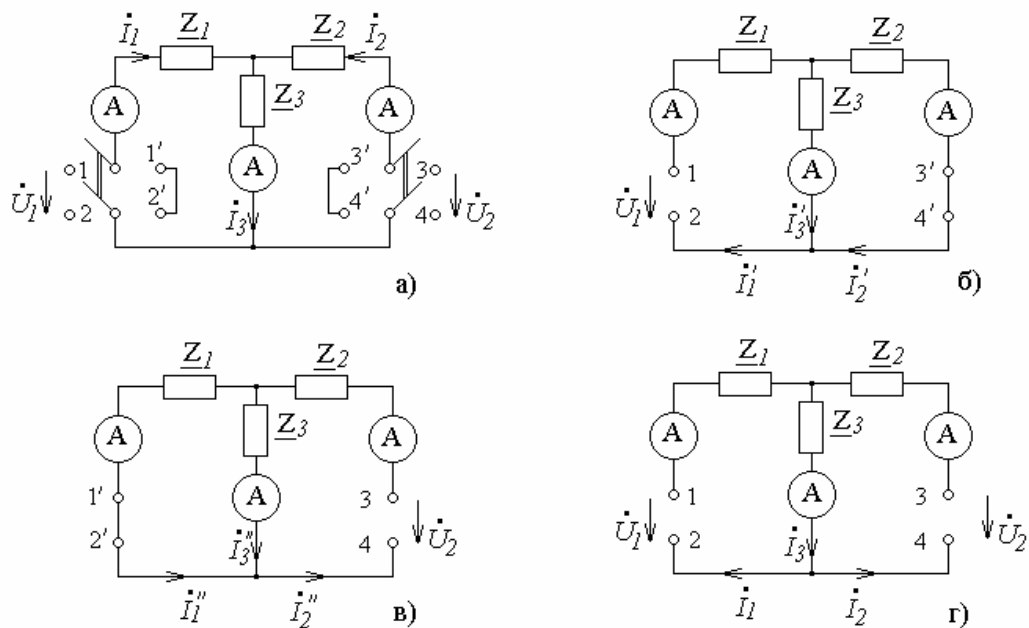


Рис.4.1. Схемы к проверке принципа наложения:

а–исходная схема для эксперимента; б–схема с источником напряжения \mathcal{U}_1 ; в– схема с источником напряжения \mathcal{U}_2 ; г–схема с двумя источниками напряжения \mathcal{U}_1 и \mathcal{U}_2

Таблица 4.1

Результаты проверки принципа наложения в схеме рис.4.1

$$\underline{Z}_1 = \dots \text{Ом}, \underline{Z}_2 = \dots \text{Ом}, \underline{Z}_3 = \dots \text{Ом}$$

Способ получения данных	U	схема б			схема в			схема г		
		I	I	I	I	I	I	I	I	I
		A	A	A	A	A	A	A	A	A
Расчет										
Опыт										

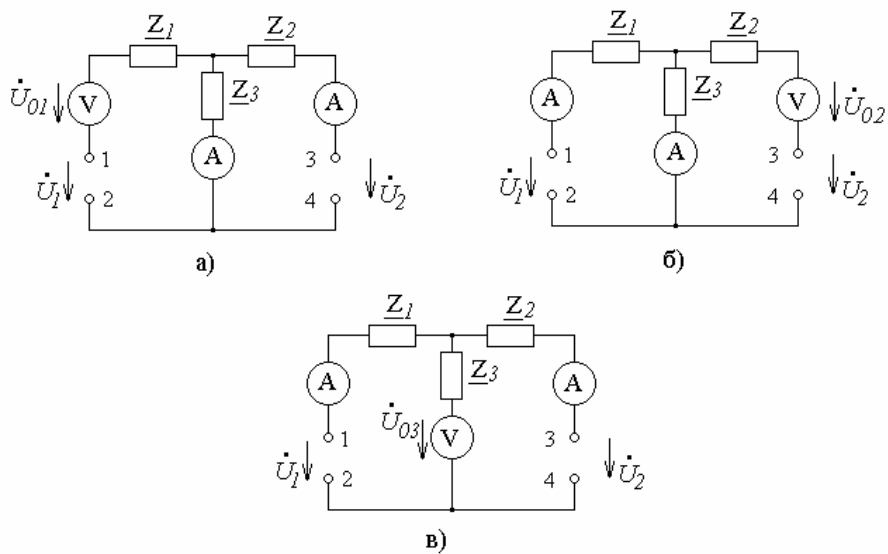


Рис.4.2. Схемы для измерения напряжений холостого хода:

а–холостой ход со стороны зажимов 1,2; б–холостой ход со стороны зажимов 3,4;

в–холостой ход в ветви с сопротивлением \underline{Z}_3

Применяя теорему об эквивалентном источнике напряжения, рассчитать токи всех ветвей I_K ($K=1,2,3$) по полученным опытными путем значениям U_{0K} , $Z_{ЭК}$, Z_K . Результаты поместить в табл.4.2.

Таблица 4.2

Данные проверки теоремы об эквивалентном источнике напряжения

Способ получе ния данных	U_{01}	Z_1	$Z_{Э1}$	I_1	U_{02}	Z_2	$Z_{Э2}$	I_2	U_{03}	Z_3	$Z_{Э3}$	I_3
	B	C	C	A	B	C	C	A	B	C	C	A
Расчет												
Опыт												

Предварительный расчет

Решить задачи, представленные в табл.4.3.

Таблица 4.3.

Задание предварительного расчета

З а д а ч а	В а р и а н т		
	1	2	3
<p>1. В схеме рис.4.1,г известны $u_1=U_1\sqrt{2}\sin\omega t$, $u_2=U_2\sqrt{2}\sin(\omega t + j_2)$, Z_1, Z_2, Z_3 (табл.4.5).</p> <p>Определить по методу наложения ток</p> <p>Результаты свести в табл.4.1.</p>	I_1	I_2	I_3
<p>2. Рассчитать этот же ток методом эквивалентного источника напряжения.</p> <p>Результаты поместить в табл.4.2.</p>	I_1	I_2	I_3
<p>3. В схеме рис.4.1,г рассчитать взаимные проводимости</p>	Y_{12}	Y_{23}	Y_{31}
	Y_{21}	Y_{32}	Y_{13}

Таблица 4.4

Исходные данные

Ном	U_1	U_2	j_{12}	Z_1	Z_2	Z_3
-----	-------	-------	----------	-------	-------	-------

ер стен да	<i>B</i>	<i>B</i>	<i>град</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>
1	24	41	30	45	50	50
2	24	41	30	45	50	30
3	24	41	30	30	50	50
4	41	24	30	50	30	40
5	41	24	30	45	50	50
6	41	24	30	50	45	30
7	41	24	-30	45	50	25
8	41	24	-30	50	45	30
9	41	24	-90	60	25	45
10	24	24	40	45	45	25

Методические указания

Метод расчета электрических цепей, основанный на принципе наложения, использует положение о независимости действия источников ЭДС или тока. В соответствии с принципом наложения сложную задачу расчета можно свести к ряду более простых задач, в каждой из которых рассчитывается электрическая цепь с одним источником ЭДС или тока. При этом все другие источники ЭДС должны быть замкнуты накоротко, а источники тока – разомкнуты (внутренние сопротивления или проводимости источников должны быть сохранены).

В исследуемой электрической цепи (схема 4.1,г) искомые токи по методу наложения рассчитываются как алгебраическая сумма составляющих, обусловленных каждым из источников U_1 и U_2 в отдельности:

$$I_1 = I_1' - I_1''$$

$$I_2 = I_2' - I_2''$$

$$I_3 = I_3' - I_3''$$

Применение метода эквивалентного источника напряжения к расчету основывается на теореме об эквивалентной замене сложной электрической

цепи по отношению к выделенной ветви на источник \underline{E}_Δ с внутренним сопротивлением \underline{Z}_Δ . При определении тока, например в ветви K , рассматриваемую ветвь необходимо разорвать, замкнув накоротко ее сопротивление. Тогда ток этой ветви вычисляется в виде

$$\underline{I}_K = \frac{\underline{E}_{\Delta K}}{\underline{Z}_{\Delta K} + \underline{Z}_K}, \quad \underline{E}_\Delta = \underline{U}_{0K},$$

где \underline{U}_{0K} – напряжение на зажимах k -ой ветви при холостом ходе (разрыве);

$\underline{Z}_{\Delta K}$ – сопротивление всей оставшейся цепи между зажимами ветви K при замкнутых накоротко источниках ЭДС (разомкнутых источниках тока);

\underline{Z}_K – сопротивление ветви K .

Взаимная проводимость Y_{qt} для ветвей q и t определяется отношением тока ветви q к напряжению источника ветви t при замкнутых накоротко источниках ЭДС (разомкнутых источниках тока). В электрических цепях, удовлетворяющих принципу взаимности, всегда имеет место равенство проводимостей

$$Y_{qt} = Y_{tq}.$$

Теоретические сведения о работе содержатся в учебной литературе: [1, §6–1, §6–2, §6–3]; [2, §5–1, §5–3]; [3, §3–25, §3–27 ... §3–30]; а также [4,5,6,7].

Контрольные вопросы

1. Перечислите методы анализа сложных линейных электрических цепей. Приведите сравнительную характеристику этих методов.
2. Предложите способ экспериментальной проверки принципа взаимности.
3. Применимы ли названные выше методы для анализа нелинейных электрических цепей?
4. Можно ли вычислить мощность методом наложения? Если нельзя, то почему?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5
РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ
С ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы – исследование резонанса напряжений и характеристик цепи при последовательном соединении резистора, индуктивной катушки и конденсатора.

Программа работы

В электрической цепи, схема которой представлена на рис.5.1, определить характеристики тока I , напряжения на индуктивной катушке U_K и напряжения на емкости U_C в зависимости от емкости конденсатора C . Данные измерений внести в табл.5.1 и построить графики этих характеристик.

По измеренным данным вычислить параметры Z, X, j для трех значений емкости C : до резонанса, при резонансе, после резонанса.

УКАЗАНИЕ. Входное напряжение поддерживать постоянным $U=15B$ при фиксированных $R_l=10\text{ Ом}$, f, L (табл.5.5). Емкость C изменять в интервале от $0,2C_0$ до $1,75C_0$ через $2,0\text{ мкФ}$. Опытным путем определить резонансное значение $C=C_0$.

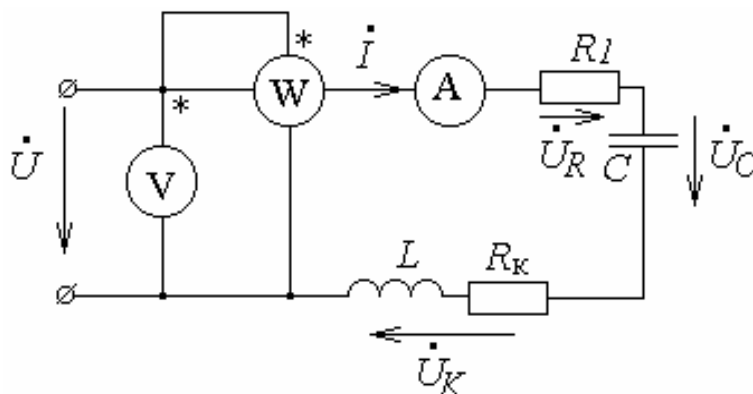


Рис.5.1.Схема к исследованию резонанса напряжений

Таблица 5.1

Характеристики схемы рис.5.1 при изменении емкости C и постоянных
 $U=15B$, $R_I=10\text{Ом}$, $f=\dots\text{Гц}$, $L=\dots\text{мГн}$

C	I	P	U_C	U_K	Z	X	j
мк	A	$B\text{т}$	B	B	Ом	Ом	гра

В этой же электрической цепи снять частотные характеристики $I(\omega), U_K(\omega), U_C(\omega)$. Данные измерений внести в табл.5.2 и построить графики этих характеристик. По измеренным данным вычислить параметры Z, X, j для трех значений емкости C : до резонанса, при резонансе, после резонанса.

УКАЗАНИЕ. Входное напряжение поддерживать постоянным $U=30B$ при фиксированных $R_I=30\text{ Ом}$, L, C (табл.5.5). Частоту f изменять в интервале от $0,3f_0$ до $1,9f_0$ (через 50 Гц). Опытным путем определить частоты: $\omega_0 = 2\pi f_0$ (максимум тока I_m), $\omega_C = 2\pi f_C$ (максимум напряжения U_C), $\omega_K = 2\pi f_K$ (максимум напряжения U_K).

Таблица 5.2

Частотные характеристики схемы рис.5.1 при $U=30B$,
 $R_I=30\text{ Ом}$, $C=\dots\text{мкФ}$, $L=\dots\text{мГн}$

f	I	P	U_C	U_K	Z	X	j
Гц	A	$B\text{т}$	B	B	Ом	Ом	гра δ

Таблица 5.3

Частотные характеристики схемы рис.5.1 при изменении R_I
 $(C=\dots\text{мкФ}, L=\dots\text{мГн})$

f	h	$R_I=30\text{ Ом}$		$R_I=10\text{ Ом}$	
		I	F_1	I	F_2

$\Gamma\zeta$	–	A	–	A	–

Снять еще раз частотную характеристику $I(w)$ в той же цепи с новым значением сопротивления $R_I=10 \text{ Ом}$. Построить графики частотных характеристик $I(w)$ для относительных величин: $F_1(h)=I/I_{01}$, $F_2(h)=I/I_{02}$, где I_{01}, I_{02} – резонансные значения токов при $R_I=30 \text{ Ом}$ и $R_I=10 \text{ Ом}$, соответственно; $h=w/w_0 = f/f_0$. Данные измерений внести в табл.5.3.

Используя построенные графики, определить добротности цепи в обоих случаях, сравнить их с расчетными значениями.

УКАЗАНИЕ. Входное напряжение поддерживать постоянным $U=15\text{В}$ при фиксированных параметрах C и L (табл.5.5).

Предварительный расчет

Для электрической цепи рис.5.1 решить задачи, представленные в табл.5.4.

Таблица 5.4

З а д а ч а	В а р и а н т		
	1	2	3
1. При известных $U=30\text{В}$, $R_I=30 \text{ Ом}$, $R_K=8 \text{ Ом}$ в режиме резонанса напряжений определить...	I	P	Z
2. При известных $R_I=30 \text{ Ом}$, $R_K=8 \text{ Ом}$, L , C (табл.5.5) определить...	Q	d	r
3. При известных $U=30\text{В}$, $R_I=30 \text{ Ом}$, $R_K=8 \text{ Ом}$, L , C (табл.5.5) определить I , U_C , U_K , если частота w задана так, что достигнут максимум величины	U	U	Y
4. Построить качественно характеристики, если переменной величиной является параметр: w	C	L	U

-		Z	U	c
	L -	U	L	Z
	C -	L	U	U
		U	c	L
		c	Z	

Таблица 5.5

Исходные данные

Стенд	L	C	f
	мГн	мкФ	Гц
1	26	3,8	260
2	24	4,2	270
3	35	2,9	240
4	26	3,9	250
5	24	4,3	260
6	25	4,1	260
7	30	3,4	240
8	23	4,4	280
9	26	4,0	270
10	22	4,6	280

Методические указания

В режиме резонанса разность фаз напряжения и тока на входе цепи равна нулю: $j = 0$. На участке цепи с последовательным соединением элементов R , L , C (рис.5.2,а) условие резонанса означает компенсацию реактивного сопротивления

$$X = X_L - X_C = 0$$

и, следовательно, компенсацию напряжений U_L и U_C (рис.5.2,б):

$$U_L - U_C = 0, \quad U = R I.$$

Такой режим называется резонансом напряжений.

При резонансе напряжений ток, активная мощность и коэффициент мощности максимальны при прочих равных условиях:

$$I = I_0 = U / R, \quad P = P_0 = UI = R I^2 = U^2 / R, \quad \cos j = 1,$$

полное сопротивление рассматриваемого участка цепи достигает минимального значения

$$Z = Z_0 = R,$$

где $R=R_l$.

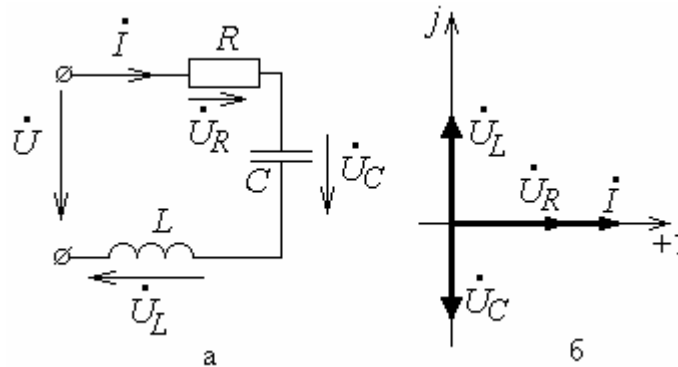


Рис.5.2. Схема с последовательным соединением элементов:
а–схема электрической цепи; б–векторная диаграмма

Условие резонанса напряжений обеспечивается, если $X_L=X_C$, т.е. $\omega L = 1/\omega C$. Из этого условия следует, что резонанса напряжений можно достичь изменением частоты ω либо параметров L и C . Величины соответствующих изменяемых параметров, при которых в цепи наступает резонанс напряжений, вычисляются по формулам:

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}, \quad L_0 = 1/(\omega^2 C), \quad C_0 = 1/(\omega^2 L).$$

Резонансные значения параметров ω_0 , L_0 , C_0 экспериментально можно определить при достижении током своего максимального значения.

Влияние параметров цепи на резонансные свойства оценивают величинами волнового (характеристического) сопротивления r , добротности Q и затухания d :

$$r = \sqrt{L/C}, \quad Q = U_{L0}/U = U_{C0}/U = r/R,$$

где U_{L0}, U_{C0} – напряжения при резонансе.

Если $r > R$, то напряжение на индуктивности (емкости) в режиме резонанса превышает напряжение на входе схемы. Величина Q показывает кратность этого превышения. Поэтому при работе с резонансной цепью необходимо учитывать величину добротности во избежание повреждения изоляции.

При изменении частоты реактивное сопротивление изменяется в соответствии с выражением

$$X = \omega L - 1/\omega C,$$

при этом полное сопротивление Z и угол сдвига фаз j вычисляются по формулам:

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

$$j = \arctg(X/R) = \arctg[(\omega L - 1/\omega C)/R].$$

Зависимости этих параметров от частоты, частотные характеристики, показаны на рис.5.3 (а, б). Как следствие, частотные характеристики тока I , напряжений на емкости и индуктивности U_C и U_L определяются по формулам:

$$I = U/Z = U/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2};$$

$$U_C = X_C I = U/\omega C \sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2};$$

$$U_L = X_L I = \omega L U/\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}.$$

Графики последних зависимостей представлены на рис.5.3,б. Частоты, при которых напряжения U_C и U_L достигают своего максимального значения, в общем случае отличаются от резонансной частоты ω_0 и определяются выражениями:

$$\omega_C = \omega_0 \sqrt{1 - 0,5R^2 C/L} = \omega_0 \sqrt{1 - 0,5d^2};$$

$$\omega_L = \omega_0^2 / \omega_C = \omega_0 / \sqrt{1 - 0,5d^2}.$$

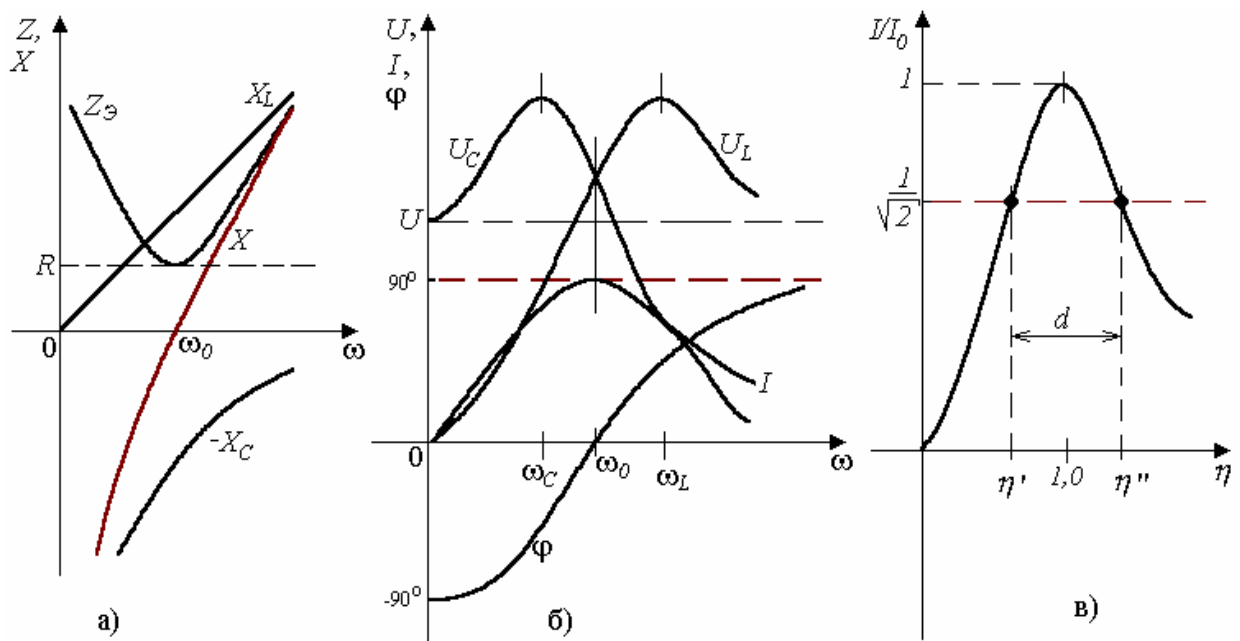


Рис.5.3. Частотные характеристики цепи с последовательным соединением элементов:

а–частотные характеристики сопротивлений цепи; б–частотные характеристики тока, сдвига фаз и напряжений; в–относительная частотная характеристика

Максимумы напряжения U_C и U_L равны

$$U_{C \max} = U_{L \max} = UQ / \sqrt{1 - 0,25d^2} .$$

Добротность схемы можно определить на основе резонансной кривой $F(h) = I / I_0$. Если на уровне $1/\sqrt{2}$ провести прямую, параллельную оси абсцисс, то она пересечет график в точках частот $h\zeta h^2$. Их разность численно равна коэффициенту затухания

$$d = h\zeta h^2 .$$

Полоса частот, лежащая в интервале от $h\zeta$ до h^2 , называется полосой пропускания рассматриваемой электрической цепи.

ЗАМЕЧАНИЕ. В отличие от идеальной схемы (рис.5.2,а) в реальной электрической цепи индуктивная катушка обладает сопротивлением R_K (см. схему рис.5.1). В связи с этим в вышеуказанных формулах под величиной R надо понимать сумму $R=R_I+R_K$. По этой же причине напряжение на индуктивной катушке следует вычислять по формуле

$$U_K = I \sqrt{R_K^2 + (\omega L)^2}.$$

Теоретические сведения о работе содержатся в учебной литературе:[1, §6–1, §6–2, §6–3]; [2, §5–1, §5–3]; [3, §3–25, §3–27...§3–30]; а также [4,5,6,7].

Контрольные вопросы

1. Дайте определение резонанса в электрической цепи на отдельном ее участке. Какой режим называют резонансом напряжений?
2. Сформулируйте условие резонанса напряжений для произвольного двухполюсника, содержащего индуктивные и емкостные элементы.
3. По какому характерному признаку можно определить наступление резонанса напряжений при выполнении экспериментов в данной лабораторной работе?
4. Дайте определение параметров цепи при резонансе напряжений: волнового сопротивления r , добротности Q , затухания d .
5. Опишите электрическое состояние цепи и энергетические процессы в ней при резонансе напряжений.
6. Как определяется полоса пропускания синусоидальных сигналов для цепи с последовательным соединением элементов R, L, C ?
7. Приведите примеры использования явлений резонанса на практике.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6

РЕЗОНАНСНЫЕ ЯВЛЕНИЯ И ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ С ПАРАЛЛЕЛЬНЫМ СОЕДИНЕНИЕМ ЭЛЕМЕНТОВ

Цель работы – исследование резонанса токов и характеристик цепи при параллельном соединении резистора, индуктивной катушки и конденсатора.

Программа работы:

В электрической цепи, схема которой представлена на рис.6.1, определить характеристики токов I, I_C, I_K в зависимости от емкости

конденсатора C . Данные измерений внести в табл.6.1 и построить графики этих характеристик. По измеренным данным вычислить параметры Y , B , φ для значений емкости C : до резонанса, при резонансе, после резонанса.

УКАЗАНИЕ. Входное напряжение поддерживать постоянным $U=20\text{ В}$ при фиксированных $R_I = 300\text{ Ом}$, f , L (табл.6.5).

Емкость изменять в интервале от $0,2 C_0$ до $1,75 C_0$ через $2,0\text{ мкФ}$. Опытным путем определить резонансное значение емкости $C=C_0$.

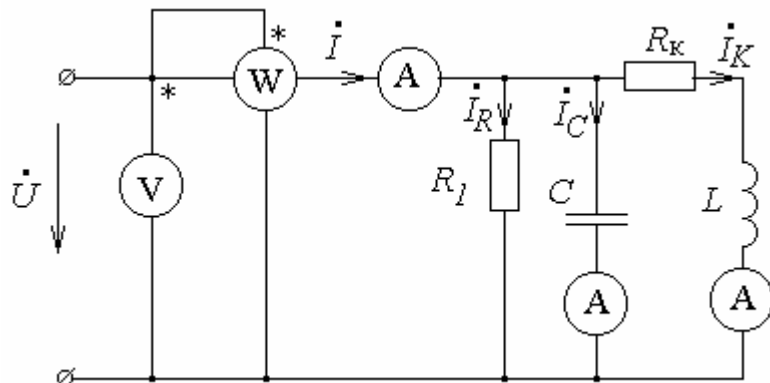


Рис.6.1. Схема к исследованию резонанса токов

В этой же электрической цепи снять частотные характеристики $I(\omega)$, $I_C(\omega)$, $I_K(\omega)$. Данные измерений внести в табл.6.2 и построить графики этих характеристик. По измеренным данным вычислить параметры Y , B , φ для 3-х значений частоты: до резонанса, при резонансе, после резонанса.

Таблица 6.1

Характеристики схемы рис.6.1 при изменении C и постоянных $U = 20\text{ В}$, $R_I=300\text{ Ом}$, $f=\dots\text{Гц}$, $L=\dots\text{мГн}$

C	I	I_C	I_K	P	Y	B	j
мкФ	А	А	А	Вт	1/Ом	1/Ом	град

УКАЗАНИЕ. Входное напряжение поддерживать постоянным $U=20\text{ В}$ при фиксированных $R_I = 300\text{ Ом}$, L , C (табл.6.5). Частоту изменять в интервале от $0,3 f_0$ до $1,9 f_0$ через 50 Гц . Опытным путем определить частоту $\omega_0=2\pi f_0$ (минимум тока I).

Таблица 6.2

Частотные характеристики схемы рис.6.1 при $U = 20\text{ В}$, $R_I=100\text{ Ом}$, $L=\dots\text{мГн}$, $C=\dots\text{мкФ}$

f	I	I_C	I_K	P	Y	B	j
$\Gamma_{ц}$	A	A	A	$Вт$	$1/Ом$	$1/Ом$	$град$

Таблица 6.3

Частотные характеристики схемы рис.6.1
при изменении R_I ($U=20 В$, $L=...мГн$, $C=...мкФ$)

f	h	$R_I=100 Ом$		$R_I=300 Ом$	
		I	F_1	I	F_2
$\Gamma_{ц}$	-	A	-	A	-

Снять ещё раз частотную характеристику $I(w)$ в этой же цепи с новым значением сопротивления $R_I=300 Ом$. Построить графики частотных характеристик $I(w)$ для относительных величин: $F_1(h)=I/I_{01}$, $F_2(h)=I/I_{02}$, где I_{01} , I_{02} – резонансные значения токов для сопротивлений 100 и 300 Ом соответственно; $h=w/w_0 = f/f_0$. Данные измерений внести в табл.6.3.

Используя построенные графики, определить добротности цепи в обоих случаях и сравнить их с расчетными значениями.

УКАЗАНИЕ. Входное напряжение поддерживать постоянным $U=20В$ при фиксированных параметрах C, L (табл.6.5).

Предварительный расчет

Для схемы электрической цепи (рис.6.1) решить задачи, представленные в табл.6.4.

Таблица 6.4

Задание предварительного расчета

З а д а ч а	Вариант		
	1	2	3
1. При известных $U=20$ В, $R_I = 300$ Ом, $R_K = 0$ Ом и условии резонанса токов определить...	Y	P	I
2. При известных $R_I = 100$ Ом, $R_K = 0$ Ом, L, C (табл.6.5) определить...	g	Q	d
3. При известных $U=20$ В, $R_I = 100$ Ом, L, C, R_K (табл.6.5) определить токи I, I_C, I_K , если относительная частота $h = \frac{f}{f_0}$ составляет...	0,7	1,2	1,5
4. При $R_K = 0$ построить качественные характеристики, если переменной величиной является параметр:	I_C $w - I_L$ $L - j$ $C -$	Y I_C I_L	I_L Y I_C

Таблица 6.5

Исходные данные

Стенд	L	C	f
	мГн	мкФ	Гц
1	26	3,8	260
2	24	4,2	270
3	35	2,9	240
4	26	3,9	250
5	24	4,3	260
6	25	4,1	260
7	30	3,4	240
8	23	4,4	280
9	26	4,0	270
10	22	4,6	280

Методические указания

На участке параллельного соединения элементов R, L, C (рис.6.2,а) условие резонанса $j = 0$ означает компенсацию реактивной проводимости

$$B = B_L - B_C \quad (6.1)$$

и, следовательно, компенсацию токов I_L и I_C (рис.6.2,б):

$$I_L - I_C = 0, \quad I = I_R. \quad (6.2)$$

Такой режим называется резонансом токов.

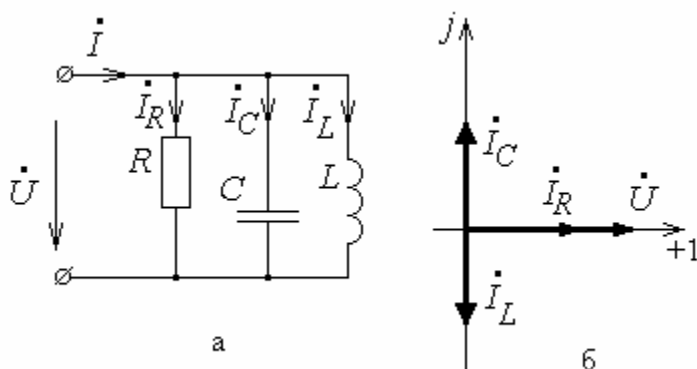


Рис.6.2. Схема с параллельным соединением элементов:
а–схема электрической цепи; б–векторная диаграмма

При резонансе токов полная проводимость рассматриваемого участка цепи Y и общий ток минимальны:

$$Y = Y_0 = G, \quad I = I_0 = UG; \quad (6.3)$$

коэффициент мощности достигает максимума:

$$\cos j = 1,$$

где $G = \frac{1}{R_1}$.

Условие резонанса токов обеспечивается, если $B_L = B_C$, т.е.

$$\frac{1}{\omega L} = \omega C. \quad (6.4)$$

Поэтому режима резонанса токов можно достичь, изменяя частоту ω , либо параметры L или C , причем их резонансные значения определяются

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad L_0 = \frac{1}{(\omega^2 C)}, \quad C_0 = \frac{1}{(\omega^2 L)}.$$

При резонансе токов ток в емкости и индуктивности превышает общий ток, если

$$B_C > G, \quad B_L > G. \quad (6.5)$$

Условие (6.6) имеет и другую форму:

$$g > G, \quad (6.6)$$

где $g = \sqrt{\frac{C}{L}}$, величина с размерностью проводимости называется волновой проводимостью цепи.

Кратность превышения токов емкости и индуктивности над общим током при резонансе характеризуется величиной добротности

$$Q = I_{C0} / I_0 = I_{L0} / I_0 = g / G. \quad (6.7)$$

Затухание цепи определяется выражением $d = 1/Q$.

При изменении частоты реактивная проводимость B изменяется в соответствии с формулой

$$B = \frac{1}{\omega L} - \omega C; \quad (6.8)$$

при этом полная проводимость

$$Y = \sqrt{G^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)^2}, \quad (6.9)$$

угол сдвига фаз –

$$j = \pm \arctg \left(\frac{B}{G} \right) = \pm \arctg \left(\frac{\left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)}{G} \right). \quad (6.10)$$

Частотные характеристики этих параметров показаны на рис.6.3(а, б). Как следствие, частотные характеристики токов I , I_C , I_L определяются формулами:

$$I = UY = U \sqrt{G^2 + \left(\frac{1}{\omega L} - \omega C \right)^2}; \quad (6.11)$$

$$I_C = UB_C = \omega C U; \quad (6.12)$$

$$I_L = UB_L = \frac{U}{\omega L}. \quad (6.13)$$

Активная мощность рассматриваемого участка цепи от частоты не зависит:

$$P = U^2 G. \quad (6.14)$$

Добротность схемы можно определить на основе резонансной кривой $F(h) = I/I_0$ (рис.6.3,в). Если провести прямую, параллельную оси абсцисс, то она пересечет график в точках частот h' , h'' . Их разность численно равна d .

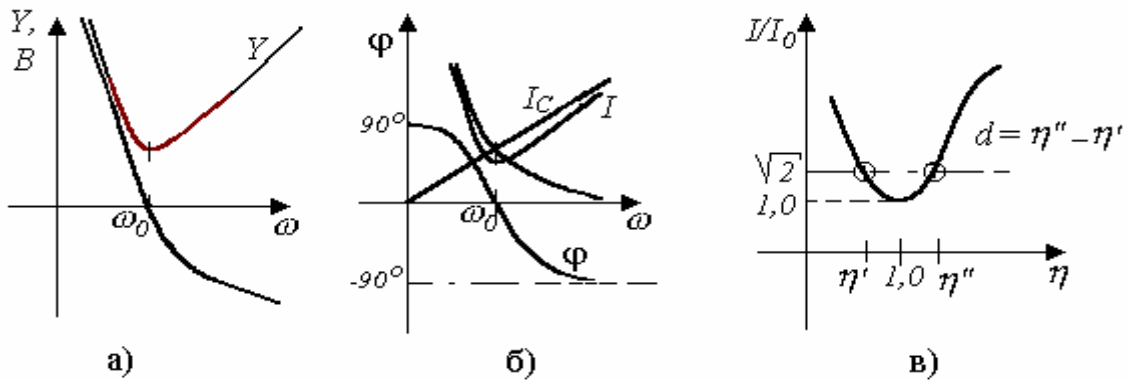


Рис.6.3. Частотные характеристики цепи с параллельным соединением элементов:

а–частотные характеристики проводимостей цепи; б–частотные характеристики токов и сдвига фаз; в–относительная частотная характеристика

ЗАМЕЧАНИЕ. В схеме с параллельным соединением элементов рис.6.1 индуктивная катушка обладает сопротивлением R_K . В связи с этим комплексная проводимость катушки \underline{Y}_K имеет активную G_K и реактивную B_L составляющие:

$$\underline{Y}_K = G_K - j B_L = \frac{R_K}{R_K^2 + X_L^2} - j \frac{X_L}{R_K^2 + X_L^2}.$$

При $R_K \neq 0$ рассмотренные соотношения (6.1) ... (6.14) следует скорректировать, сделав следующие замены:

вместо $G_{\Sigma} = \frac{1}{R_I}$ использовать $G_{\Sigma} = \frac{1}{R_I} + \frac{R_K}{R_K^2 + X_L^2}$,

вместо $B_L = \frac{1}{\omega L}$ использовать $B_L = \frac{X_L}{R_K^2 + X_L^2}$.

Комплексный ток индуктивной катушки также имеет активную $I_a = U G_K$ и реактивную $I_L = U B_L$ составляющие:

$$\underline{I}_K = I_a - j I_L = I_K e^{j\phi_K},$$

где $I_K = U Y_K = U \sqrt{G_K^2 + B_L^2} = \sqrt{I_a^2 + I_L^2}$,

$$j_K = \arctg\left(\frac{B_L}{G_K}\right) = \arctg\left(\frac{\omega L}{R_K}\right).$$

При этом условие резонанса токов принимает вид:

$$\frac{\omega_0 L}{R_K^2 + \omega_0^2 L^2} = \omega_0 C,$$

а резонансная частота определяется по формуле

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_K^2}{L^2}}.$$

Теоретические сведения к работе содержатся в учебной литературе: [1, §6–4, §6–5]; [2, §5–3, §5–4]; [3, §3–26, §3–30]; а также [4,5,6,7].

Контрольные вопросы

1. Какой режим называют резонансом токов?
2. Сформулируйте условие резонанса токов для произвольного двухполюсника.
3. По какому характерному признаку можно определить наступление резонанса токов при выполнении эксперимента в данной лабораторной работе?
4. Что характеризуют собой параметры волновой проводимости g , добротности Q и затухания d и как можно их определить экспериментально в электрической цепи при параллельном соединении элементов R, C, L ?
5. Каков характер цепи (угол $j > 0$ или $j < 0$) при параллельном соединении элементов R, C, L до возникновения режима резонанса и после него при изменении емкости C ? При изменении частоты?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №7

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ СО ВЗАИМНОЙ ИНДУКТИВНОСТЬЮ

Цель работы – исследование свойств линейных электрических цепей со взаимной индуктивностью.

Программа работы

По схеме рис.7.1 определить параметры – (R_K , L) каждой из двух индуктивных катушек, используемых в данной работе. Результаты свести в табл.7.1. Напряжение U на зажимах цепи поддерживать 30 В, частоту f для данного пункта и всех последующих выбрать в соответствии с табл.7.6.

Установить однополярные зажимы указанной пары индуктивно связанных катушек.

УКАЗАНИЕ. Соединить катушки последовательно, выбрав произвольно их зажимы, рис.7.2. Повторить эксперимент, пересоединив концы одной из катушек. При согласном включении полное сопротивление цепи больше, чем при встречном.

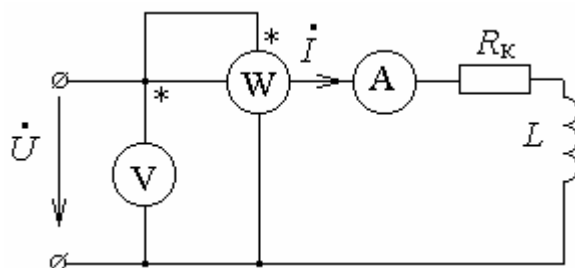


Рис.7.1. Схема к определению параметров индуктивных катушек

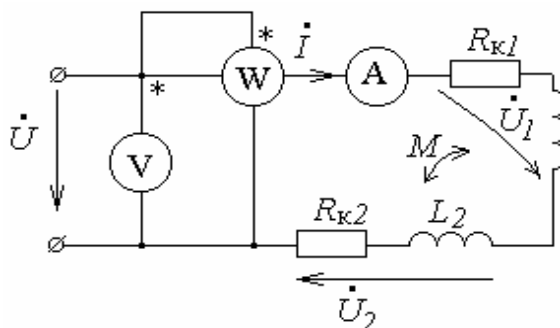


Рис.7.2. Последовательное соединение индуктивно связанных катушек

Таблица 7.1

Параметры индуктивных катушек (схема рис.7.1) при $f = \dots Гц$

Катушка	U	I	P	Z	X	R	L
	В	А	Вт	Ом	Ом	Ом	мГ н
1							
2							

В схеме рис.7.2 выполнить измерения, при двух способах соединения: согласном и встречном. По результатам измерений вычислить параметры цепи, в том числе взаимную индуктивность и коэффициент связи. Все данные свести в табл.7.2. Построить векторные диаграммы для согласного и встречного соединений.

Проверить экспериментально принцип взаимности электрической цепи в схеме, где две индуктивно связанные катушки включены по схеме воздушного трансформатора, – рис.7.3.

УКАЗАНИЕ. Сначала напряжение от источника \mathcal{U} подать к зажимам первичной обмотки $U_1=30\text{ В}$, вторичную обмотку разомкнуть (холостой ход), – рис.7.3,а. После выполнения всех измерений осуществить холостой ход со стороны вторичной обмотки, – рис.7.3,б. При этом напряжение U'_2 подать такой величины, чтобы токи в обоих случаях были равны. Свидетельством выполнения принципа взаимности должно служить совпадение величин напряжений U_2 первой схемы и U'_1 – второй. Данные экспериментов поместить в табл.7.3.

Таблица 7.2

Параметры последовательной цепи с индуктивной связью (схема рис.7.2) при $f = \dots\text{Гц}$

Включе- ние	U	U	U	I	P	Z	R	X	j	L
	B	B	B	A	B	C	C	C	e	m
соглас										
встреч										
	$X_M = \dots$			$M = \dots$			$k = \dots$			

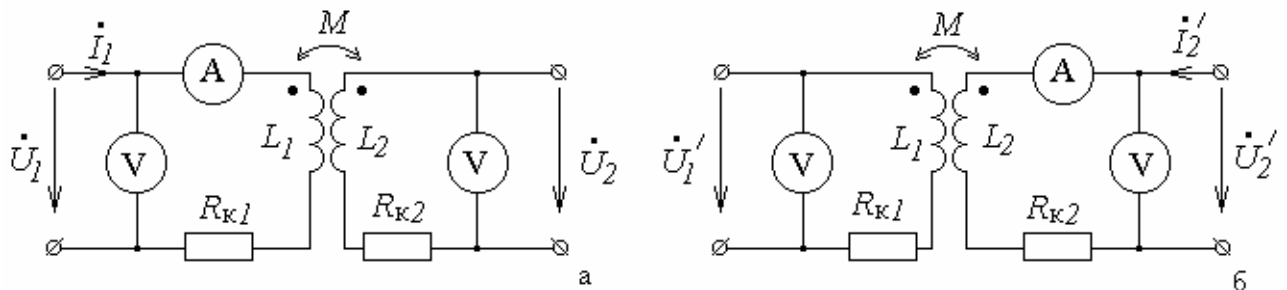


Рис.7.3. Воздушный трансформатор в режиме холостого хода:

а–холостой ход со стороны входных зажимов; б– холостой ход со стороны выходных зажимов

Таблица 7.3

Электрический режим воздушного трансформатора (схема рис.7.3)

Схема	U_1	I_1	U_2	I_2	M
	B	A	B	A	$мГн$
а					
б					

Таблица 7.4

Режим воздушного трансформатора с нагрузкой (схема рис.7.4)

U_1	I_1	P_1	I_2	Z	R	X	ΔR	ΔX
B	A	$Вт$	A	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$	$Ом$

По результатам исследования воздушного трансформатора в п.7.2.4 (табл.7.3) определить взаимную индуктивность M .

По схеме рис.7.4 исследовать работу воздушного трансформатора при заданной нагрузке Z_H . Напряжение $U_1=30 B$. Определить активное ΔR и реактивное ΔX сопротивления, вносимые в первичную цепь трансформатора со стороны вторичной цепи, а также проверить баланс активной мощности в цепи воздушного трансформатора. Все данные свести в табл.7.4.

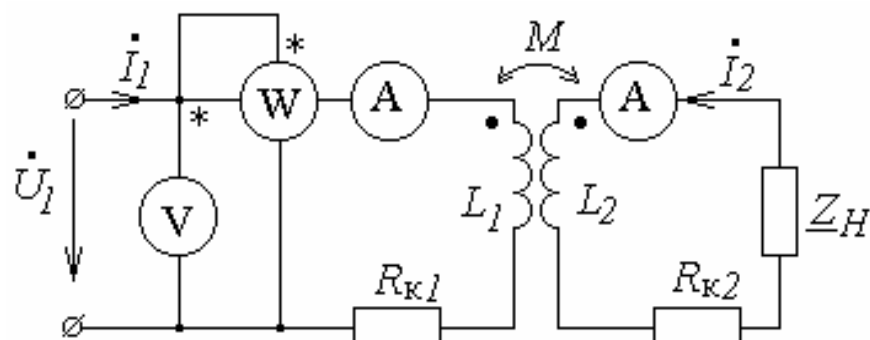


Рис.7.4. Воздушный трансформатор с нагрузкой

Предварительный расчет

Решить задачи, представленные в табл.7.5

Таблица 7.5

Задание предварительного расчета

З а д а ч а	Вариант		
	1	2	3
1. В схеме рис.7.2 при известных $L_1=L_2=L$, $R_{K1}=R_{K2}=8$ Ом, k , f (табл.7.6.) определить эквивалентные параметры для согласного и встречного соединений ...			
2. В схеме рис.7.2 при известных $U=30$ В, $L_1=L_2=L$, $R_{K1}=R_{K2}=8$ Ом, k , f (табл.7.6.) определить величины для согласного и встречного соединений ...	U 1		2
3. Построить качественные векторные диаграммы для схемы рис.7.2. при согласном и встречном соединениях, если $L_1=L_2$, $R_{K1}=R_{K2}$, а взаимная индуктивность равна ...	$\frac{L}{2}$		
4. В схеме рис.7.4 при известных $U=30$ В, $L_1=L_2=L$, $R_{K1}=R_{K2}=8$ Ом, k , f (табл.7.6) определить ...	P 1	1	

Методические указания

Полные потокосцепления, обусловленные взаимной индуктивной связью двух катушек, определяются в соответствии с выражениями:

$$y_{M2} = M_{12}i_1, \quad y_{M1} = M_{21}i_2,$$

где цифровые индексы ассоциированы с первой и второй катушками. Для линейных электрических цепей с взаимной индуктивностью всегда выполняется:

$$M_{12}=M_{21}=M,$$

где M – взаимная индуктивность. Эта формула отражает принцип взаимности для индуктивно связанных катушек. Применительно к данной работе он может быть сформулирован и таким образом: одинаковым токам катушек соответствуют одинаковые потокоцепления взаимной индукции.

Направления потоков взаимной индукции и самоиндукции могут не совпадать. Для учета этого обстоятельства зажимы катушек маркируют, исходя из следующих соображений. Полагая, что $M > 0$, будем называть однополярными зажимы двух катушек в том случае, если токи относительно этих зажимов направлены одинаково и указанные потоки совпадают по направлению. Если при последовательном соединении направление тока по отношению к однополярным зажимам в обеих катушках одинаково, то говорят, что катушки соединены согласно (рис.7.5,а), в противном случае – встречно (рис.7.5,б).

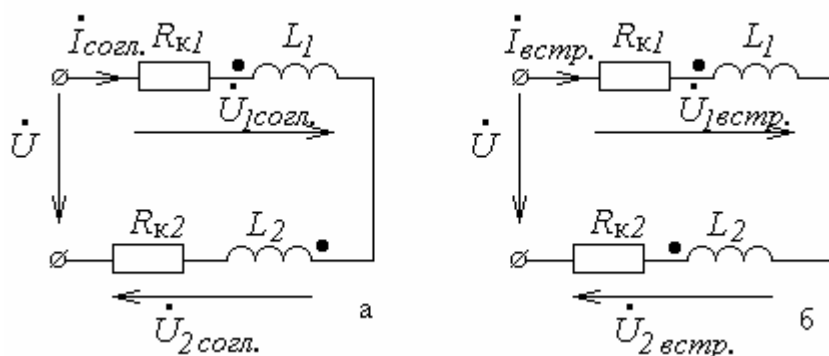


Рис.7.5. Согласно (а) и встречное (б) соединения

Если известны параметры каждой катушки и их взаимная индуктивность, то при последовательном согласном включении эквивалентные параметры схемы равны:

$$L_{\text{согл.}} = L_1 + L_2 + 2M,$$

$$X_{\text{согл.}} = X_1 + X_2 + 2X_M = \omega L_{\text{согл.}}$$

$$\underline{Z}_{\text{согл.}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 2\underline{Z}_M = (R_{k1} + R_{k2}) + j\omega L_{\text{согл.}}$$

В этом случае комплексные напряжения на катушках $\underline{U}_{1\text{согл.}}$ и $\underline{U}_{2\text{согл.}}$ распределены в соответствии с выражениями:

$$\underline{U}_{1\text{согл.}} = \frac{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_M}{\underline{Z}_{\text{согл.}}} \underline{U},$$

$$\underline{U}_{2\text{согл.}} = \frac{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_M}{\underline{Z}_{\text{согл.}}} \underline{U},$$

и комплексный ток в цепи равен

$$\underline{I}_{\text{согл.}} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{\text{согл.}}},$$

где $\underline{Z}_M = jX_M = j\omega M$ – комплексное сопротивление взаимной индукции (сопротивление связи).

На рис.7.6 приведены векторные диаграммы цепи последовательного соединения при согласном и встречном включении индуктивно связанных катушек.

Аналогичные величины при встречном включении подсчитываются по формулам:

$$L_{\text{встр.}} = L_1 + L_2 - 2M,$$

$$X_{\text{встр.}} = X_1 + X_2 - 2X_M = \omega L_{\text{встр.}}$$

$$\underline{Z}_{\text{встр.}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M = (R_{k1} + R_{k2}) + j\omega L_{\text{встр.}}$$

$$\underline{U}_{1\text{встр.}} = \frac{\underline{Z}_1 - \underline{Z}_M}{\underline{Z}_{\text{согл.}}} \underline{U},$$

$$\underline{U}_{2\text{встр.}} = \frac{\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M}{\underline{Z}_{\text{согл.}}} \underline{U},$$

$$\underline{I}_{\text{встр.}} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{\text{встр.}}}.$$

Из рассмотренных последних выражений можно получить формулы для вычисления M :

$$M = \frac{(\underline{Z}_{\text{согл.}} - \underline{Z}_{\text{встр.}})}{4j\omega} = \frac{(X_{\text{согл.}} - X_{\text{встр.}})}{4\omega} = \frac{(L_{\text{согл.}} - L_{\text{встр.}})}{4}.$$

Степень индуктивной связи катушек характеризуется коэффициентом СВЯЗИ

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}},$$

который всегда меньше единицы.

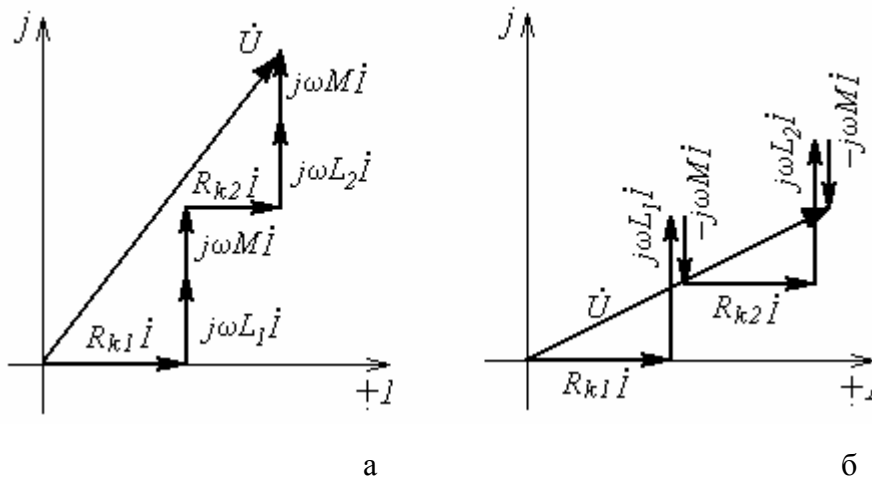


Рис.7.6. Векторные диаграммы:

а– согласное включение; б– встречное включение

Комплексное сопротивление одной из двух рассмотренных индуктивных катушек равно

$$\underline{Z} = R_{K1} + j\omega L_1.$$

Если вторую катушку, индуктивно связанную с первой (рис.7.7), замкнуть на сопротивление $\underline{Z}_H = R_H + jX_H$, то эквивалентное сопротивление всей схемы изменится и станет равным

$$\underline{Z}_{\text{ex}} = (R_K + \Delta R) + j(X_1 + \Delta X) = R_{\text{ex}} + jX_{\text{ex}},$$

где ΔR и ΔX – вносимые активное и реактивное сопротивления, причем

$$\Delta R = \frac{X_M^2 (R_{K2} + R_H)}{(R_{K2} + R_H)^2 + (X_2 + X_H)^2},$$

$$\Delta X = \frac{-X_M^2 (X_2 + X_H)}{(R_{K2} + R_H)^2 + (X_2 + X_H)^2}.$$

Если $Z_H = \infty$ (холостой ход), то $I_2 = 0$ и, следовательно,

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1},$$

что обеспечивает еще один практический способ определения взаимной индуктивности.

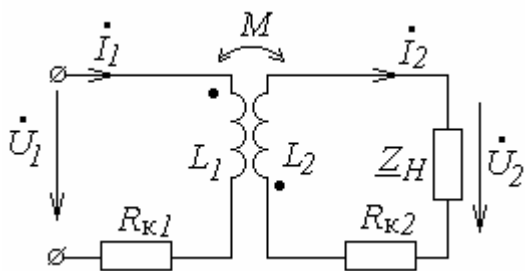


Рис.7.7. Воздушный трансформатор

Баланс активной мощности в цепи воздушного трансформатора определяется соотношением

$$P_1 = I_1^2 R_{K1} + I_2^2 R_{K2} + P_2,$$

где $P_1 = \text{Re}[U_1^* I_1]$ – активная мощность, потребляемая всей цепью;

$I_1^2 R_{K1} + I_2^2 R_{K2}$ – активная мощность, потребляемая первичной и вторичной катушками, соответственно;

$P_2 = \text{Re}[U_2^* I_2]$ – активная мощность, потребляемая нагрузкой ($P_2 = I_2^2 R_H$). Следовательно, через магнитную связь из первичной во вторичную цепь воздушного трансформатора передается активная мощность, равная

$$P_{12} = I_2^2 R_{K2} + P_2.$$

Теоретические сведения к работе содержатся в учебной литературе: [1, §3–7, §5–16, §5–17]; [2, §8–1 ... §8–8]; [3, §3–36 ... §3–39]; а также [4,5,6,7].

Контрольные вопросы

1. Дайте определение взаимной индуктивности двух катушек. Предложите экспериментальный способ маркировки их зажимов.
2. Охарактеризуйте экспериментальные способы измерений взаимной индуктивности. Изобразите схемы измерительных цепей и покажите, как и какие приборы должны быть включены.
3. Дайте определение коэффициента связи. Укажите пределы его изменения.
4. В каких пределах изменяется эквивалентная индуктивность двух последовательно соединенных индуктивно связанных катушек индуктивности?
5. Постройте векторные диаграммы токов, напряжений для электрической цепи, составленной из двух последовательно соединенных индуктивно связанных катушек.
6. Сформулируйте баланс мощностей воздушного трансформатора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №8

РЕЗОНАНС В ИНДУКТИВНО СВЯЗАННЫХ КОНТУРАХ

Цель работы – исследование резонансных явлений и частотных характеристик в двух индуктивно связанных контурах.

Программа работы

Для каждой из двух исследуемых катушек L_1 и L_2 опытным путем (рис.8.1) подобрать емкости C_1 и C_2 соответственно, из условия настройки контуров на одну и ту же резонансную частоту $f_0 = 500 \text{ Гц}$; $U = 15 \text{ В}$, $R_{01} = R_{02} = 10 \text{ Ом}$.

Снять резонансные кривые двух индуктивно связанных контуров (рис.8.2) при $R_{01} = R_{02} = 0$. Построить графики резонансных кривых $I_1(\omega)$, $I_2(\omega)$. Определить коэффициент связи по экспериментально найденным частотам ω_1 , ω_2 , соответствующим режиму резонансов напряжений. Данные свести в

табл.8.1.

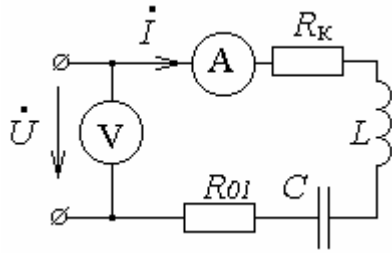


Рис.8.1. Схема настройки контуров

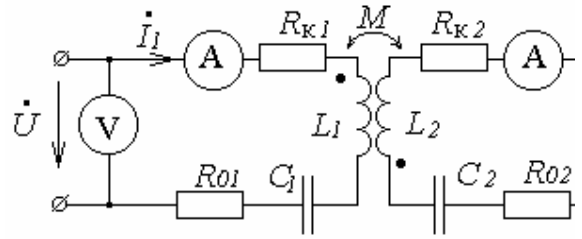


Рис.8.2. Схема индуктивно связанных контуров

Построить график частотной характеристики $I_2(\omega)$ в относительных величинах $F_1(h) = I_2 / I_{20}$, где I_{20} – максимальное значение тока I_2 , $h = \omega / \omega_0$.

Найти полосу пропускания индуктивно связанных контуров (см. пункт 5.4.5. в работе 5).

УКАЗАНИЕ. Напряжение поддерживать постоянным $U = 15 \text{ В}$ при изменении частоты в пределах от $0,6 f_0$ до $1,6 f_0$. В случае, если экстремальные значения тока I_2 , соответствующие частотам ω_1 и ω_2 , не совпадают по величине, как это должно иметь место при точном выполнении условия $L_1 C_1 = L_2 C_2$, то в качестве I_{20} брать среднее арифметическое из двух значений.

Вычислить значение критического сопротивления $R_{кр}$ и с учетом сопротивлений катушек R_{K1} и R_{K2} установить в контурах добавочные сопротивления:

в первом – $R_{01} \geq R_{кр} - R_{K1}$,

во втором – $R_{02} \geq R_{кр} - R_{K2}$.

УКАЗАНИЕ. Критическое сопротивление вычисляется по формуле

$$R_{кр} = k \sqrt{L / C}.$$

Таблица 8.1

Частотные характеристики индуктивно связанных контуров при $R_{K1} = \dots \text{Ом}$, $L_1 = \dots \text{мГн}$, $R_{K2} = \dots \text{Ом}$, $L_2 = \dots \text{мГн}$, $C_1 = \dots \text{мкФ}$, $C_2 = \dots \text{мкФ}$

f	$R_{01} = R_{02} = 0, \quad U = 15 \text{ В}$	$R_{01} \neq 0, \quad R_{02} \neq 0, \quad U = 30 \text{ В}$
-----	---	--

	I_1	I_2	h	F_1	f	I_1	I_2	h	F_2
Γ ω	A	A	–	–	Γ ω	A	A	–	–

Повторить опыт по снятию частотных зависимостей $I_1(\omega)$, $I_2(\omega)$ при условии введения в каждый из контуров критического сопротивления. Данные свести в табл.8.1. Построить графики резонансных кривых $I_1(\omega)$, $I_2(\omega)$.

Построить график частотной характеристики $I_2(\omega)$ в относительных величинах $F_2(h) = \frac{I_2}{I_{20}}$. Используя построенный график, определить полосу пропускания индуктивно связанных контуров.

Сравнить полосы пропускания индуктивно связанных контуров в двух случаях $R_{01}=R_{02}=0$ и $R_{01} \neq 0, R_{02} \neq 0$.

Предварительный расчет

Для схемы электрической цепи рис.8.2. решить задачи, представленные в табл.8.2.

Таблица 8.2

Задание предварительного расчета

З а д а ч а	В а р и а н т		
	1	2	3
. Для схемы рис.8.2 при известных $R_{01}=R_{02}=0, R_{K1}=R_{K2}=8 \text{ Ом}, L_1=L_2=L, f_0=500 \text{ Гц}$ (табл.7.6) и условиях	C_1	C_2	Q_1

собственного резонанса каждого контура определить ...			
2. В схеме рис.8.2 при известных $R, f_0=500$ Гц (табл.7.6) определить частоту, на которой ток I_1 имеет ...	1-й макс.	2-й макс.	мин .
3. Для схемы рис.8.2 построить качественную резонансную кривую $I_2(\omega)$, если ...	$Q > \frac{1}{k}$	$Q = \frac{1}{k}$	$R_{K2} = 0$ $R_{02} = 0$

Методические указания

Как следует из общей теории реактивных двухполюсников, рассматриваемая электрическая цепь в идеальном случае (при $R_{K2} = 0$), для частотной характеристики, $X_{ex}(\omega)$, – рис.8.3,а, пунктирная линия, – должна иметь в числе особых точек два нуля (частота ω_1 и ω_2) и один полюс (частота ω_0).

Нулям характеристики соответствуют режимы резонансов напряжений цепи, полюсу – режим резонанса токов. При $R_{K2} \neq 0$ эта зависимость идет так, как показано на рис.8.3,а, сплошной линией и ей соответствует зависимость $I_1(\omega)$, приведенная на рис.8.3,б.

Экстремальные значения тока I_1 в точках ω_1, ω_2 равны друг другу при условии совпадения собственных резонансных частот каждого из контуров:

$$\omega_0 = \omega_{01} = \omega_{02} = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}} = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}.$$

Существование двух экстремумов является следствием высокой добротности контуров. Так, например, если добротности контуров равны $Q_1 = Q_2 = Q$, то это условие принимает вид $Q > \frac{1}{k}$, где k – коэффициент связи.

По мере уменьшения добротности контуров частоты ω_1 и ω_2 сближаются, и при некотором ее критическом значении $Q = \frac{1}{k}$ экстремумы сливаются в один. Особенность такого режима (обычно называемого режимом полного резонанса) состоит в том, что ширина полосы пропускания в $\sqrt{2}$ раза больше, чем у одиночного контура с такой же добротностью.

8.4.2. Если колебательные контуры настроены на одну частоту $\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0$ и затухание второго контура мало в сравнении с коэффициентом связи k , то частоты ω_1 и ω_2 определяются по формулам:

$$\omega_1 \approx \frac{\omega_0}{\sqrt{1+k}}, \quad \omega_2 \approx \frac{\omega_0}{\sqrt{1-k}},$$

причем $\omega_1 < \omega_0$, $\omega_2 > \omega_0$. Следовательно, коэффициент оценивается величиной

$$k = \frac{(\omega_2^2 - \omega_1^2)}{(\omega_2^2 + \omega_1^2)}.$$

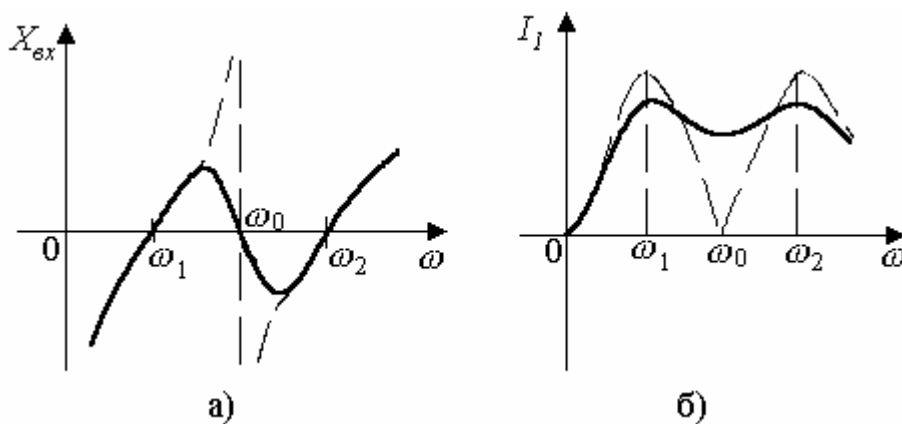


Рис.8.3. Частотные характеристики цепи с индуктивно связанными контурами:
а–частотная характеристика входного реактивного сопротивления; б–частотная характеристика входного тока

Теоретические сведения к работе содержатся в учебной литературе: [1, §6–8, §6–9]; [2, §8–9, §8–10, §8–11]; [5, §9–2].

Контрольные вопросы

1. Приведите частотную характеристику входного реактивного сопротивления двух индуктивно связанных контуров в идеальном случае, при

наличии потерь. То же – для зависимости $I_1(\omega)$. Объясните ход этих кривых.

2. Пусть $R_{02}=0$. Изобразите векторные диаграммы токов и напряжений индуктивно связанных контуров для трех случаев:

а) при частоте ω_0 ; б) при частоте ω_1 ; в) при частоте ω_2 . Полагать

$$\omega_{01}=\omega_{02}=\frac{1}{\sqrt{L_1C_1}}=\frac{1}{\sqrt{L_2C_2}}.$$

3. Оценить значения частот ω_1 , ω_2 , при которых наступают резонансы напряжений, если известны параметры цепи L_1 , C_1 , L_2 , C_2 и коэффициент связи k .

4. При каком условии резонансные кривые двух индуктивно связанных контуров имеют один максимум?

5. Как можно приближенно вычислить коэффициент связи двух индуктивно связанных контуров по резонансным кривым?

Библиографический список

1. *Нейман Л.Р., Демирчян К.С.* Теоретические основы электротехники.– Т.1.–Л.: Энергия, 1981.–536 с.
2. *Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники: Ч.1. –М.: Энергия, 1978.–572 с.
3. *Бессонов Л.А.* Теоретические основы электротехники: В 2 т. Т.1: Электрические цепи. –М.: Высш. шк., 1984.–560 с.
4. *Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В.* и др. Основы теории цепей. –5-е изд.–М.: Энергоатомиздат, 1989.–528 с.
5. Теоретические основы электротехники: В 2 т. Т.1. /Под ред. П.А. Ионкина. –2-е изд.–М.: Высш. шк., 1976.–544 с.
6. *Матханов П.Н.* Основы анализа электрических цепей. Линейные цепи: Учебник. –М.: Высш. шк., 1981.
7. *Татур Т.А.* Основы теории электрических цепей: Справочное пособие.

–М.: Высш. шк., 1980.–271 с.

8. *Белецкий А.Ф.* Теория линейных электрических цепей: Учебник. –М.: Радио и связь, 1986.

9. *Попов В.П.* Основы теории цепей: Учебник. –М.: Высш. шк., 2000.

10. *Лосев А.К.* Теория линейных электрических цепей: Учебник. –М.: Высш. шк., 1987.

11. *Новгородцев А.Б.* 30 лекций по теории электрических цепей: Учебник. – Санкт-Петербург: Политехника, 1995.

12. *Попов В.П.* Основы теории цепей: Учебник. – 3-е изд., испр. –М.: Высш. шк., 2000. –575 с.

*Сборник лабораторных работ
по курсу «Теоретические основы электротехники»*

Часть 1

Методические указания

Корректор Л.В. Яриш

Техн. Редактор Н.М. Белохонова

Подписано в печать Формат 60×84/16

Усл.печ.л.3,72. Уч.-изд.л.1,97.

Тираж 100 экз. Заказ 103.

Издательство ДВГТУ, 690950, Владивосток, Пушкинская, 10
Типография издательства ДВГТУ, 690950, Владивосток, Пушкинская, 10