

Министерство образования Республики Беларусь

**Учреждение образования
«Гомельский государственный технический
университет имени П. О. Сухого»**

Кафедра «Теоретические основы электротехники»

В. В. Соленков, В. В. Брель

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по курсу «Теоретические основы электротехники»
для студентов специальностей
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»,
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»
и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

Гомель 2012

УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211я73
С60

*Рекомендовано научно-методическим советом
энергетического факультета ГГТУ им. П. О. Сухого
(протокол № 4 от 27.12.2011 г.)*

Рецензент: канд. техн. наук, доц. каф. «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого
Ю. А. Рудченко

Соленков, В. В.
С60 Электрические цепи однофазного синусоидального тока : лаборатор. практикум по курсу «Теоретические основы электротехники» для студентов специальностей 1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети», 1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)», 1-43 01 07 «Техническая эксплуатация энергооборудования организаций» и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы» днев. и заоч. форм обучения / В. В. Соленков, В. В. Брель. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2012. – 97 с. – Систем. требования: PC не ниже Intel Celeron 300 МГц ; 32 Mb RAM ; свободное место на HDD 16 Mb ; Windows 98 и выше ; Adobe Acrobat Reader. – Режим доступа: <http://alis.gstu.by/StartEK/>. – Загл. с титул. экрана.

Данное издание является второй частью лабораторного практикума по курсу «Теоретические основы электротехники» и содержит теоретические сведения и задания по выполнению расчетно-лабораторных работ по разделу «Цепи однофазного синусоидального тока». В работах даны схемы и задания на теоретические расчеты и экспериментальные исследования, контрольные вопросы и литература для самостоятельного изучения.

Для студентов электротехнических специальностей всех форм обучения, изучающих курс «Теоретические основы электротехники».

**УДК 621.3.011.7(075.8)
ББК 31.211я73**

© Учреждение образования «Гомельский
государственный технический университет
имени П. О. Сухого», 2012

Введение

Настоящее пособие является второй частью лабораторного практикума, содержащего рекомендации по применению стендов УИЛС в учебном процессе, а также описание расчетно-лабораторных работ (РЛР). Методическое пособие составлено в соответствии с программой курса «Теоретические основы электротехники» и предназначено для студентов электротехнических специальностей дневного и заочного отделений.

Оно содержит описания РЛР по анализу установившихся режимов в линейных цепях однофазного синусоидального тока. Для выполнения этих РЛР используется блок переменного напряжения, расположенный слева в средней части пульты (рис.1, поз.2, заштрихован), а также блоки 6, 7, 8.

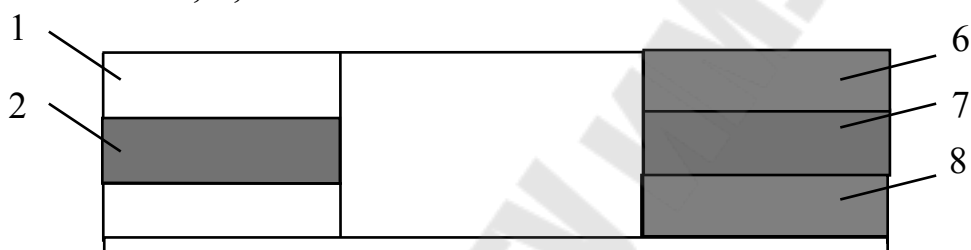


Рис.1

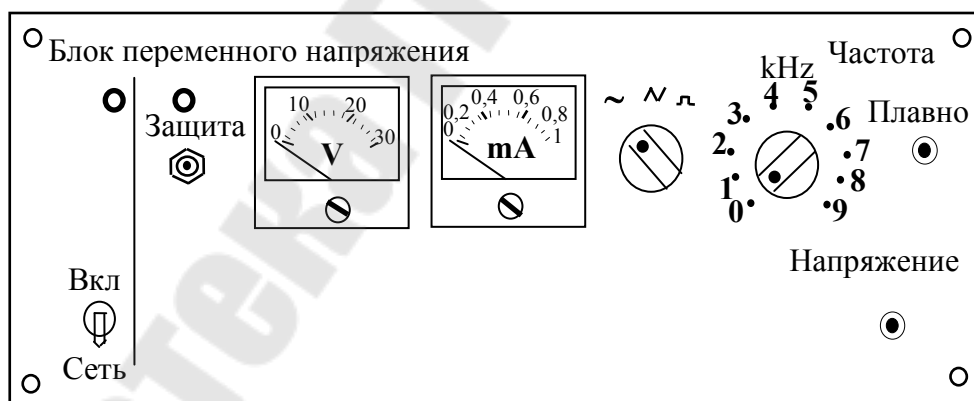


Рис.2

Блок переменного напряжения (рис.2) представляет собой регулируемый стабилизированный источник, обеспечивающий напряжение 5...25 В и ток до 1 А при частоте 0,1...8,0 кГц. На лицевой панели слева направо расположены:

- 1 и 4 - тумблер и контрольная лампа источника питания;
- 2 и 3 - кнопка и контрольная лампа электронной защиты блока;

5 - переключатель выбора формы кривой напряжения (положение «~»);

6 и 7 - переключатель ступенчатого и ручка плавного изменения частоты;

8 - ручка плавного изменения напряжения; вольтметр и амперметр, контролирующие выход блока;

9 - выходные гнезда блока питания.

Включение блока в работу после срабатывания защиты осуществляется кнопкой 2.

Блок переменной индуктивности (БПИ, рис.3, поз.7 на рис.1) позволяет получить на выходе L_4 индуктивность в диапазоне 0,1...99,9 мГ со степенью регулирования 0,1 мГ и при допустимом токе до 0,2 А. К выходам L_1 ... L_3 подключены катушки с индуктивностью в диапазоне 300...600 мГ.

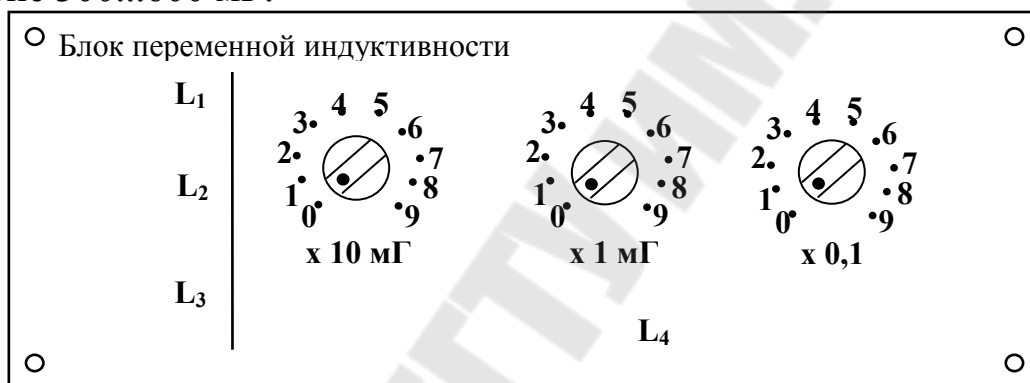


Рис.3

Блок переменной емкости (БПЕ, рис.4, поз.8 на рис.1) обеспечивает на выходе C_4 изменение емкости от 0,01 до 9,99 $\mu\text{Ф}$ со степенью регулирования 0,01 $\mu\text{Ф}$. К выходам C_1 ... C_3 блока подключены конденсаторы с емкостью в диапазоне 5...20 $\mu\text{Ф}$.

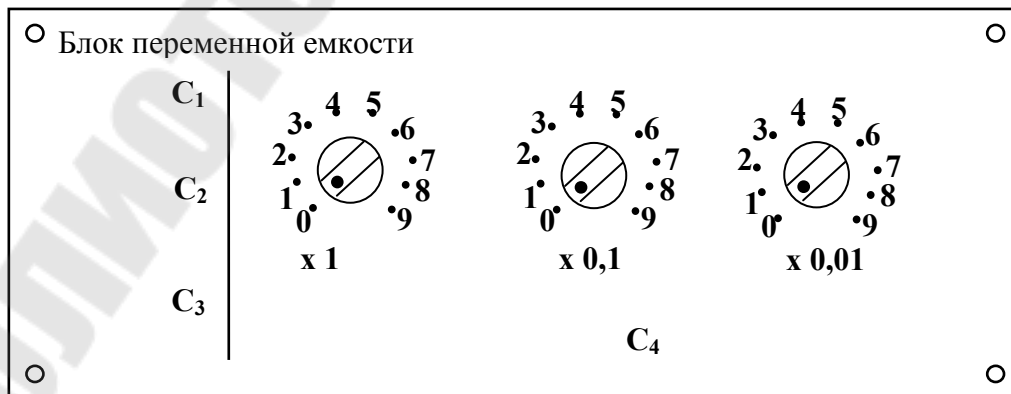


Рис.4

Лабораторная работа № 2.1

Измерение параметров синусоидального напряжения с помощью осциллографа

Цели работы:

1. Получение навыков работы с осциллографами С1-93 и С1-83.
2. Измерение амплитуды, длительности и частоты переменного напряжения.
3. Измерение разности фаз двух напряжений одной частоты.

Программа работы

1. Изучение органов управления осциллографа и их функции.
2. Наблюдение исследуемого напряжения и измерение его параметров.
3. Измерение разности фаз.

Порядок и методика проведения измерений





В работе используются:

- регулируемый стабилизированный источник переменного напряжения;
- пассивные элементы: БПС и БПЕ;
- осциллограф С1-93 или С1-83.







1. Изучение органов управления осциллографа и их функции

Перед началом работы с осциллографом необходимо органы управления (рис. 1(а, б)) установить в следующие положения:

- тумблер ПИТАНИЕ выключен (\blacksquare - утоплен);
- ручку ЯРКОСТЬ \odot - в крайнее левое ;
- ручки ФОКУС \otimes (\odot - С1-83), перемещение луча по вертикали « \updownarrow », перемещение луча по горизонтали « \leftrightarrow » - в среднее ;
- переключатели «V/ДЕЛ» - 5 В (0,5 В - С1-83);
- ручки потенциометров « \triangleright », « \blacktriangledown » - крайнее правое ;
- переключатель режима работы входов « $\approx \perp \sim$ » - « \perp » ;

- переключатели режима работы усилителей «I», «...», «I+II» , «→→» , «II» , (II « X-Y» - C1-83) - «I»;
- кнопки полярности синхронизирующего сигнала «+-» - «+» для C1-83;
- переключатель изменения усиления каналов «×1, ×10» - в «10» (C1-83) ;
- ручку «УРОВЕНЬ» - крайнее *правое* ;
- переключатель «АВТ.ЖДУЩ.» - «АВТ»;
- переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ.» - «1ms»;
- кнопки «СИНХРОНИЗАЦИЯ» - «ВНУТР I»;
- кнопки смены полярности «  ,  » - в «  » ;
- тумблер «  » - *включить*.

Для включения осциллографа необходимо:

- потянуть на себя ручку ПИТАНИЕ ( - вытянуто), при этом загорается сигнальная лампочка;
- через 2-3 мин. после включения необходимо установить луч в пределах рабочей части экрана, отрегулировать его яркость и фокус так, чтобы изображение луча было ярким и четким. Это производится ручками «», « (⊙)», «», «»;
- ручкой «» канала «I» совместите линию развертки со средней линией экрана.

2. Для наблюдения исследуемого напряжения необходимо соблюдать следующий порядок действий:

2.1. Выбрать вид синхронизации. Обычно применяется внутренняя синхронизация ВНУТР I или ВНУТР II («I , II» - C1-83) .

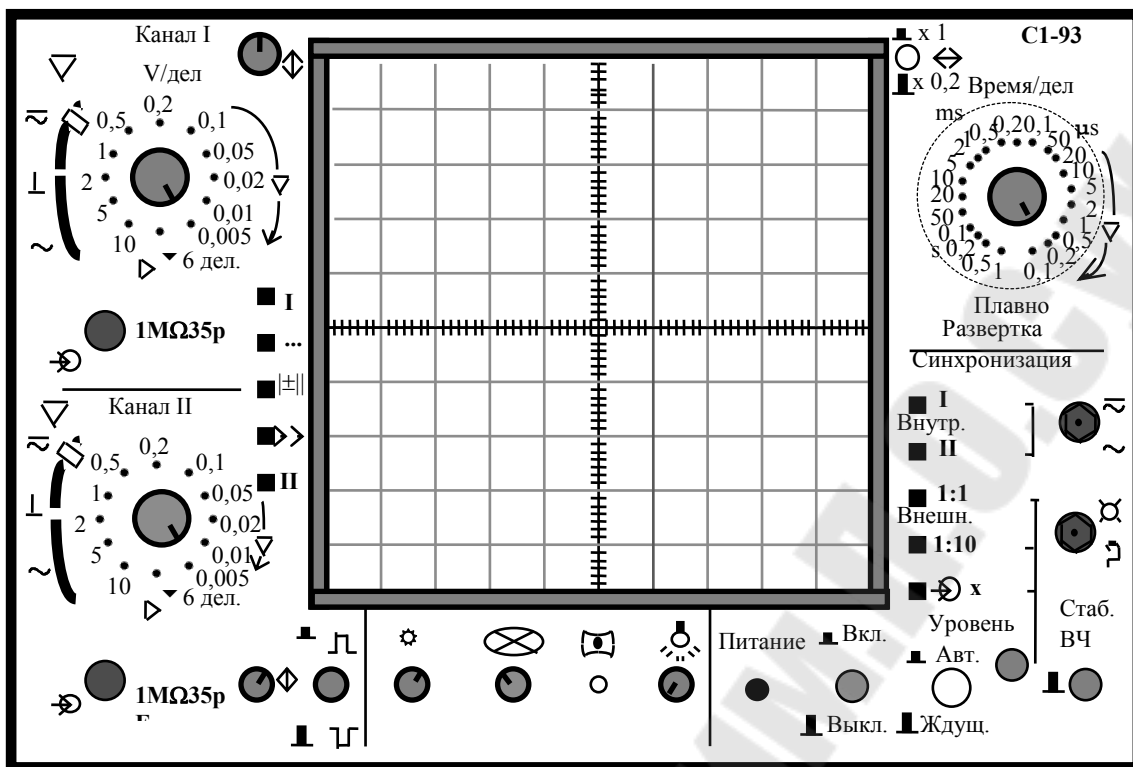


Рис. 1,а

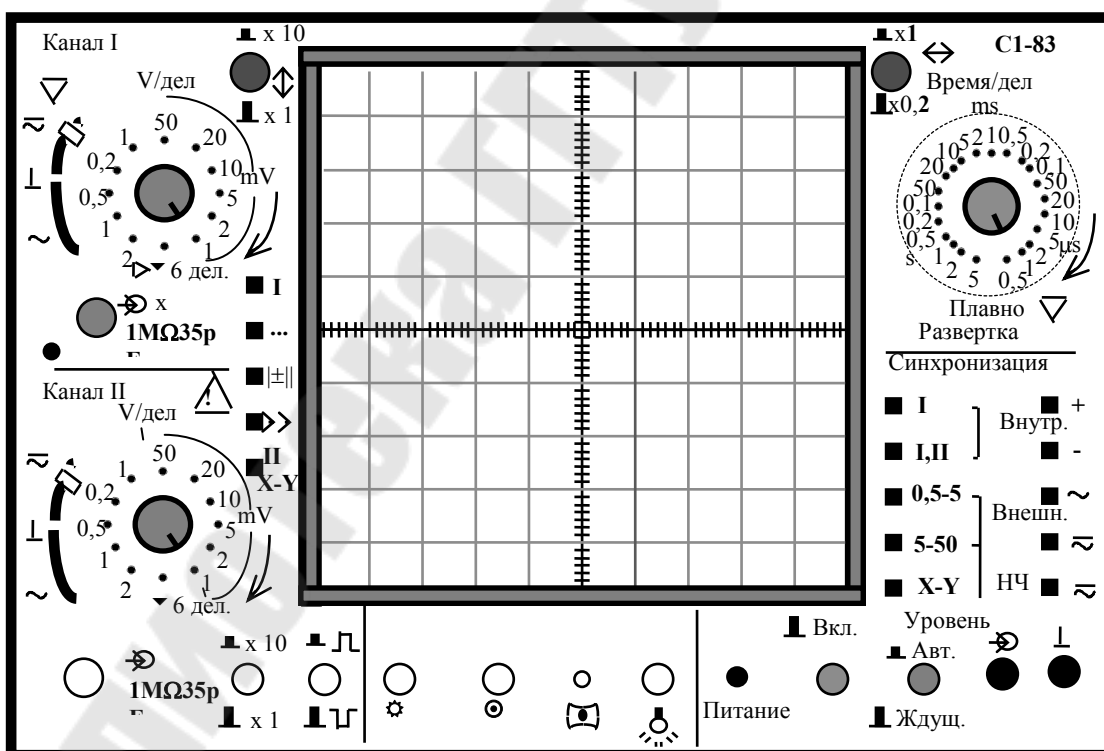


Рис. 1,б

2.2. Подайте исследуемое напряжение с выхода блока переменного напряжения (поз.9, рис.2) с помощью коаксиального кабеля на гнездо Φ « $IM\Omega 30pF$ ($IM\Omega 35pF-C1-83$)» одного из каналов «I» или «II» .

Величину и частоту напряжения задает преподаватель. При этом следует выбрать характер входа переключателя режима работы входов усилителя (« \approx », \perp , \sim »). Если исследуются *периодические* напряжения, то переключатель режима устанавливается в положение « \sim ». Если в напряжении присутствуют как *переменная*, так и *постоянная* составляющие, то - « \approx » . При включении на « \perp » вход усилителя подключен к корпусу и на экране осциллографа высвечивается горизонтальная линия.

2.3. Плавно поворачивая ручку «УРОВЕНЬ», добиться получения на экране устойчивого изображения синусоиды.

2.4. Изменяя положение переключателей «V/ДЕЛ» и потенциометров « \triangleright » и « \blacktriangledown », получить удобный для наблюдения размер изображения по вертикали.

2.5. Изменяя положение переключателя «ВРЕМЯ/ДЕЛ» и ручки «ПЛАВНО», а также переключателя « $\times 0,2$ » (« $\times 1$, $\times 0,2$ » -C1-83), получить удобный размер изображения по горизонтали. В положении « $\times 0,2$ » скорость развертки увеличивается в 5 раз.

3. Измерение амплитуды напряжения

Для проведения измерения проделайте следующие операции:

3.1. Выполните п.2.2.;

3.2. Нажмите одну из кнопок режима работы усилителя. Тогда в положении:

- «I» - на экране осциллографа наблюдается напряжение *канала I* ;
- «II» («X-Y» - C1-83) - на экране осциллографа наблюдается напряжение *канала II* ;
- «I + II» - на экране осциллографа наблюдается напряжение, равное алгебраической сумме напряжений I и II каналов ;
- «...» или « $\rightarrow\rightarrow$ » - на экране осциллографа наблюдается напряжение *обоих каналов* одновременно.

ВНИМАНИЕ!!! Нажимать две кнопки одновременно нельзя, т.к. это приводит к поломке осциллографа.

- 3.3. Поставьте переключатели «V/ДЕЛ» и («×1, ×10» -С1-83) в такое положение, чтобы амплитуда изображения составляла больше половины шкалы.
- 3.4. Ручкой «УРОВЕНЬ» установите устойчивое изображение. Поставьте переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» в положение, при котором наблюдается *несколько периодов* исследуемого напряжения, ручка потенциометра «▷» должна быть установлена в крайнее *правое* положение.
- 3.5. Установите ручку «↕» так, чтобы *минимальный* уровень сигнала совпадал с одной из *нижних* линий, а *максимальный* находился в *пределах* экрана. Ручкой «↔» сместите изображение таким образом, чтобы один из верхних максимумов находился на вертикальной *средней линии* шкалы (рис.2, кривая 1).
- 3.6. Измерьте расстояние в делениях между нижней и верхней точками амплитуды. Умножьте расстояние в делениях шкалы на показание переключателей «V/ДЕЛ» и («×1, ×10» -С1-83).

ПРИМЕР: Размах вертикального отклонения составляет 8 больших делений, переключатель «V/ДЕЛ» установлен в положение «50 mV», а переключатель «×1, ×10» - в положение «×10» . Амплитуда

напряжения составляет $U_m = \frac{8 \cdot 50 \cdot 10}{2} = 2000 \text{ мВ} = 2,0 \text{ В}$.

Осуществить проверку величины амплитуды этого же напряжения путем включения на зажимы источника питания вольтметра, тогда $U_m = U\sqrt{2}$.

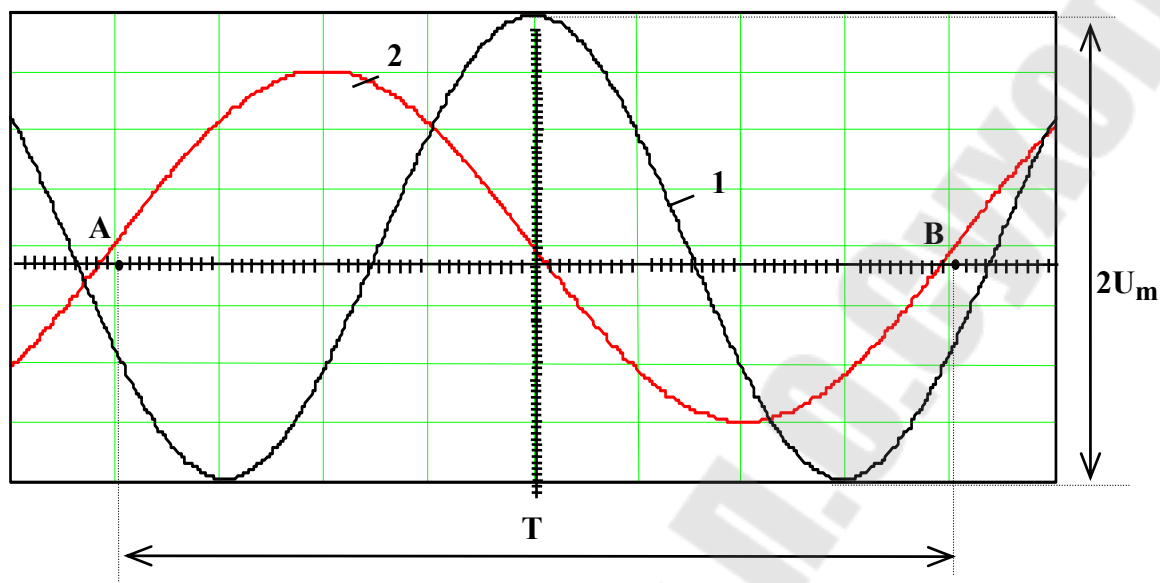


Рис. 2

4. Измерение периода и частоты напряжения

Для измерения *периода* исследуемого напряжения произведите следующие операции:

- 4.1. Подайте исследуемое напряжение на гнездо « $\text{1M}\Omega\text{30pF}$ ($\text{1M}\Omega\text{35pF-C1-83}$)»;
- 4.2. Установите переключатель «V/ДЕЛ» в такое положение, чтобы изображение на экране составило около 5...7 делений, а переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» - в положение, при котором расстояние между измеряемыми точками будет *меньше* 10 делений ;
- 4.3. Установите ручкой «УРОВЕНЬ» устойчивое изображение на экране осциллографа;
- 4.4. Переместите ручкой « \updownarrow » изображение так, чтобы точки, между которыми измеряется время, находились на *горизонтальной* центральной линии, а синусоида была симметрична относительно нее. Ручкой « \leftrightarrow » переместите изображение так, чтобы эти же точки находились в пределах *десяти* центральных делений сетки;
- 4.5. Измерьте горизонтальное расстояние между точками и умножьте его на коэффициент развертки и положение переключателя « $\times 1, \times 10$ » (C1-83) .

ПРИМЕР: расстояние между точками А и В составляет 8 делений (рис. 2, кривая 2), переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» установлен в положение «0,2 ms», а переключатель «×1, ×0,2» - в положение «×1». Период напряжения будет $T = 0,2 \cdot 8 \cdot 1 = 1,6\text{мс}$,

а частота напряжения $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{1,6 \cdot 10^{-3}} = 625\text{Гц}$.

5. Измерение разности фаз

Для измерения разности фаз двух напряжений одной частоты выполните следующие операции:

- 5.1. Установите переключатели «≈, ⊥, ~» обоих каналов в положение «~», переключатель режима работы в положение «...» или «→→» (режим «...» обычно применяют при частотах сигналов < 50 Гц), переключатель синхронизации - в положение «ВНУТР I»;
- 5.2. Подайте одно (*опорное*) напряжение на вход «⊕ IМΩ30pF (IМΩ35pF-C1-83)» канала I, а другое (*сравниваемое*) - на вход «⊕ IМΩ30pF (IМΩ35pF-C1-83)» канала II. Опорный сигнал должен *предшествовать* сравниваемому по времени;
- 5.3. Установите переключателями «V/ДЕЛ» и ручками «▷» обоих каналов идентичные изображения (около 6-7 делений по амплитуде), а ручкой «УРОВЕНЬ» устойчивое изображение;
- 5.4. Установите переключатель «ВРЕМЯ/ДЕЛ» на скорость развертки, обеспечивающую *один период* напряжений на экране;
- 5.5. Переместите кривые напряжений к центру градуированной линии ручками «↑»;
- 5.6. Измерьте размер периода опорного сигнала l_1 и разность фаз l_2 (в делениях шкалы) (рис. 3);
- 5.7. Разность фаз φ вычислите по формуле $\varphi = \frac{l_1}{l_2} \times 360^\circ$.

ПРИМЕР: $l_2 = 1,2$ деления; $l_1 = 5$ делений; $\varphi = \frac{1,2}{5} \times 360^\circ = 86,4^\circ$

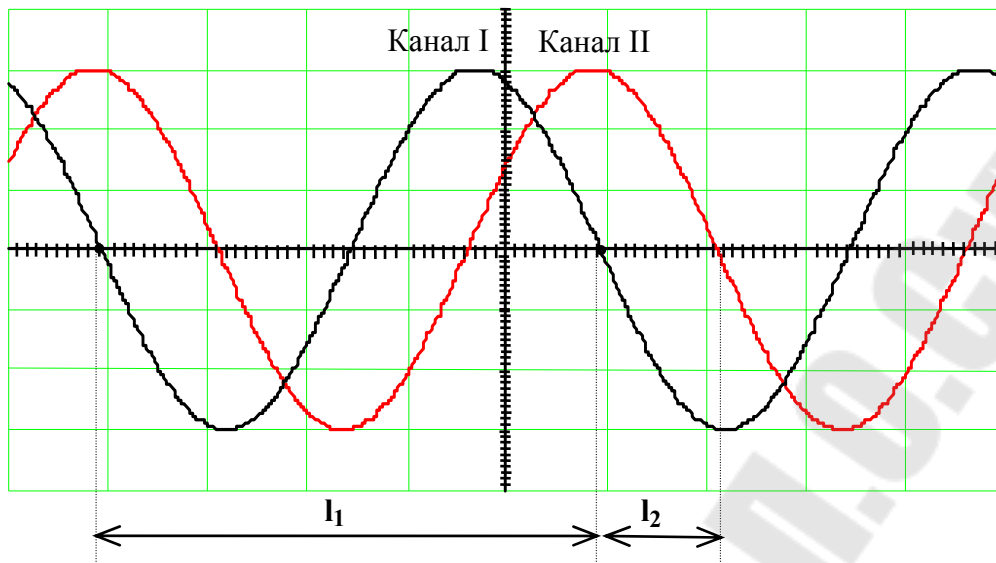


Рис. 3

Расчетно-лабораторная работа N 2.2

Электрическая цепь переменного тока и ее элементы

Цели работы:

1. Получение навыков измерения параметров резистора, конденсатора и катушки индуктивности.
2. Снятие вольтамперных характеристик элементов электрической цепи синусоидального тока.
3. Измерение разности фаз между гармоническими напряжениями и токами.

Программа работы

1. Определить фактические параметры резисторов, конденсаторов и индуктивных катушек на заданной частоте и сравнить их с номинальными параметрами.
2. Снять вольтамперные характеристики (**ВАХ**) конденсаторов и индуктивных катушек.
3. Снять **ВАХ** источника переменного напряжения и определить его параметры.
4. Измерить разность фаз между напряжением и током в резисторе, конденсаторах и индуктивных катушках.

Краткие сведения из теории

Переменным электрическим током называется ток, изменяющийся с течением времени. В технике наибольшее распространение получил *синусоидальный (гармонический)* ток. Электрический ток неразрывно связан с магнитным и электрическим полями. При переменном токе эти поля изменяются во времени. Изменяющееся магнитное поле наводит ЭДС, изменение электрического поля сопровождается изменением зарядов в проводниках. В электрической цепи нельзя выделить какого-либо участка, с которым не были бы связаны эти явления. Для того, чтобы упростить исследования процессов в реальной электрической цепи переменного тока, ее, как и цепь постоянного тока, заменяют схемой замещения, составленной из элементов, каждый из которых учитывает одно из этих явлений.

К пассивным элементам схемы при переменных токах относятся *резистор* с сопротивлением R , *катушка* с индуктивностью L , *конденсатор* с емкостью C . Их условные обозначения показаны на рис.1.1. Следует обратить внимание на то, что выбранные направления токов совпадают с напряжениями на этих пассивных элементах.

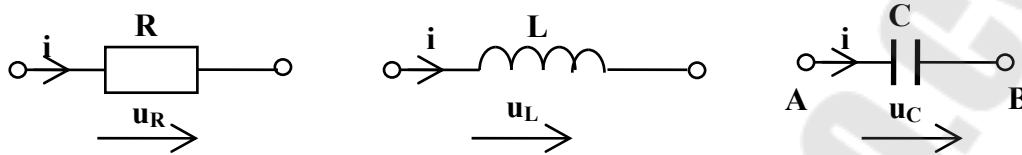


Рис.1.1

В резисторе R электромагнитная энергия преобразуется в тепло. Мощность преобразования энергии в тепло равна Ri^2 . Это преобразование носит необратимый характер - электрическая энергия переходит в тепловую. По этой причине сопротивление R является *активным* сопротивлением в отличие от *реактивных* сопротивлений конденсатора C , катушки индуктивности L , где необратимого преобразования энергии нет. Напряжение на сопротивлении и ток в нем связаны *законом Ома*

$$u_R = Ri$$

Элемент схемы - *индуктивность* L , учитывает энергию $L\frac{i^2}{2}$ магнитного поля и явление самоиндукции. При изменении тока в индуктивности возникает ЭДС *самоиндукции* e_L . По *закону Ленца* она препятствует изменению тока. Для того, чтобы через индуктивность проходил переменный ток, на ее зажимах должно быть напряжение, равное и противоположное наведенной ЭДС

$$e_L = -L \frac{di}{dt}; u_L = -e_L; u_L = L \frac{di}{dt}$$

Элемент схемы - *емкость* C учитывает энергию $C\frac{u^2}{2}$ электрического поля. На электродах емкости заряды равны и противоположны по знаку $q_A = C(\varphi_A - \varphi_B)$; $q_B = C(\varphi_B - \varphi_A)$, где φ_A и φ_B - потен-

циалы точек А и В соответственно. Заряд q_A и напряжение $u_C = \varphi_A - \varphi_B$ имеют одинаковые знаки, т.е. $q = Cu$.

Ток в ветви с емкостью равен скорости изменения заряда на электродах и при указанном положительном направлении тока знак тока совпадает со знаком производной во времени от заряда. Действительно, приросту q_A соответствует положительное значение тока, убыли заряда q_A - отрицательное значение тока. Поэтому можно написать

$$i = \frac{dq}{dt} = C \frac{du_C}{dt}; \quad u_C = \frac{1}{C} \int i dt.$$

Графики изменения *мгновенных* значений синусоидальных тока i и напряжения u от времени представлены на рис.1.2 и определяются выражениями

$$i = I_m \sin(\omega t - \psi_i), \quad u = U_m \sin(\omega t + \psi_u),$$

где U_m, I_m - амплитуды напряжения и тока;

$\omega t + \psi_u$ и $\omega t + \psi_i$ - фазы напряжения и тока;

ψ_u, ψ_i - начальные фазы, равные фазам в момент времени $t=0$.

При $\psi_u > 0$ начало синусоиды сдвинуто влево, а при $\psi_i < 0$ - вправо от начала координат;

ω - угловая частота, она показывает на сколько радианов увеличивается фаза в секунду (рад/с или c^{-1}); $\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi f$;

T - период, это время, за которое совершается одно полное колебание (с);

f - частота, это число полных колебаний за 1 сек (Гц).

φ - разность фаз между напряжением и током,

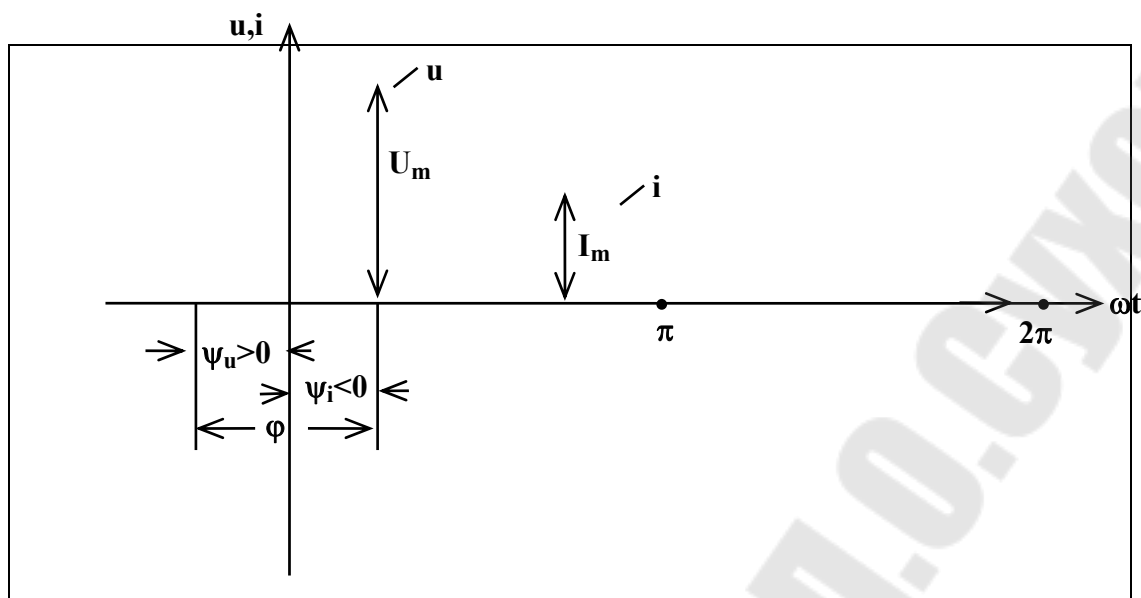


Рис.1.2

Если у синусоидальных функций одной частоты одинаковые начальные фазы, то говорят, что они совпадают по фазе, если разность их фаз равна $\pm\pi$, то говорят, что они противоположны по фазе.

Для суждения о механических и тепловых действиях переменного тока вводится понятие о его действующем значении. *Действующее значение* переменного тока равно такому значению постоянного тока, которое производит тот же тепловой эффект, что и переменный за промежуток времени, равный периоду переменного тока. В общем случае оно определяется по выражению

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2(t) dt},$$

а для синусоидального тока $I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$.

Действующее значение измеряют приборами электромагнитной, электродинамической и тепловой систем.

Порядок и методика проведения исследований

В работе используются:

- регулируемый источник ИП постоянного напряжения;

- регулируемый стабилизированный источник переменного напряжения (рис.2);
- пассивные элементы 01...10- резисторы; 14...19- конденсаторы; 11,12 - индуктивные катушки и БПС.
- измерительные приборы и осциллограф, установленные на стенде.

Примечание

При выполнении данной и последующих лабораторных работ следует помнить, что длительная надежная работа электрической цепи требует предварительной оценки теплового режима ее элементов при заданных условиях работы. Исходными данными такой оценки являются: топология электрической цепи, технические характеристики (параметры) ее элементов и заданные условия работы, включая возможные отклонения (изменение топологии и параметров элементов, крайние и аварийные режимы и т.п.)

Оценка (анализ) теплового режима представляет собой расчет токов в каждом из элементов цепи и последующее сравнение его с соответствующим допустимым значением. При этом должно выполняться условие

$$I_k \leq I_{нк} = \sqrt{\frac{m_{нк}}{R_k}},$$

где I_k - ток в к-том элементе, А;

$I_{нк}$ - номинальный (допустимый) ток к-го элемента, А;

$P_{нк}$ - номинальная мощность рассеяния к-го элемента, Вт;

R_k - фактическая величина сопротивления к-го элемента, Ом.

1. Переключатель 5 (рис.2) установите в положение «~», соответствующее синусоидальной форме напряжения источника. Частоту напряжения выберите произвольно или по указанию преподавателя в диапазоне от 200 Гц до 1 кГц. Для этого, например, при $f = 1,0$ кГц переключатель 6 установите в положение 1, а ручку 7 - в правое крайнее положение. Проверьте установленную частоту напряжения, используя осциллограф или частотомер.

Измерение фактических параметров исследуемых элементов ИЭ произвести, используя метод амперметра и вольтметра по схеме рис.1.3.

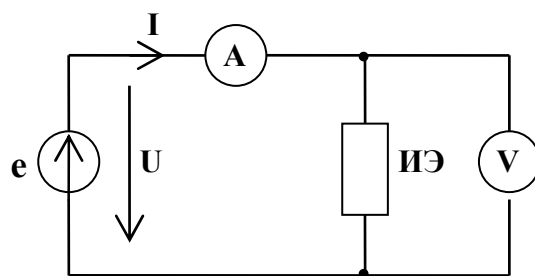


Рис.1.3

Перед измерением активных сопротивлений двух любых резисторов, выбранных из элементов 01...06 внесите в табл.1.1 их номинальные R_n , U_n , I_n и фактические значения R_k , определенные в РЛР N 1.1 (табл.1.1).

Таблица 1.1

Цепи:	постоянного тока				переменного тока			
номер элемента	R_n Ом	U_n В	I_n А	R Ом	U В	I А	f Гц	R Ом
.....								
.....								

В процессе измерений напряжение источника установите ручкой **8** таким, чтобы показания приборов не превышали соответствующих номинальных значений $U_{нк}$, $I_{нк}$. После расчета фактических сопротивлений резисторов сравните их со значениями, определенными ранее в цепи постоянного тока.

- Номинальные емкости и допустимые отклонения $\delta_{нк}$ двух, выбранных из элементов 14...19, конденсаторов определите визуально. Далее, используя схему рис.2.1, произведите измерения напряжения и тока в каждом конденсаторе и по закону Ома определите их реактивные сопротивления, считая конденсаторы близкими к идеальным. Зная частоту напряжения источника, вычислите емкости конденсаторов. Расчетные формулы $X = \frac{U}{I}$, $X = \frac{1}{\omega C}$. Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 1.2.

Таблица 1.2

Номер	C_n	δ_n	U	I	f	X	C	δ
эле- мента	мкФ	%	В	А	Гц	Ом	мкФ	%
.....								
.....								

Измеренные значения емкостей конденсаторов сравните с номинальными. Отклонение C от C_n определите по формуле

$$\delta = \frac{C - C_n}{C_n} \cdot 100\%.$$

Сравните δ_n и δ и при $\delta > \delta_n$ сообщите об этом преподавателю.

3. Определение параметров R_k , L_k реальных индуктивных катушек производится двумя методами:

- с использованием источника постоянного тока;
- трех вольтметров.

а) Метод с использованием источника постоянного тока

Для определения активного сопротивления R_k реальных катушек их поочередно подключают к источнику ИП постоянного напряжения по схеме рис.1.3. При этом измерительные приборы необходимо перевести в режим измерения постоянных напряжения и тока. Напряжение источника ИП (в последующих экспериментах - источника синусоидального напряжения) установите таким, чтобы ток в катушках не превышал 100 мА.

Измерение модуля полного сопротивления Z_k и определение индуктивности L_k реальных катушек производите по схеме рис.1.3. Расчетные формулы

$$Z_k = \frac{U}{I}; X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}; X_k = 2\pi f L_k; \varphi_k = \arctg \frac{X_k}{R_k}.$$

Результаты измерений и расчетов занесите в табл.1.3.

Таблица 1.3

Цепи:	постоянного тока			переменного тока						
Реальные катушки	U	I	R _к	U	I	Z _к	f	X _к	L _к	φ _к
	В	А	Ом	В	А	Ом	Гц	Ом	Гн	град
11										
12										

б) Метод трех вольтметров

Реальную катушку (R_k, L_k) соединяют последовательно с резистором R и подключают к источнику синусоидального напряжения (рис.1.4).

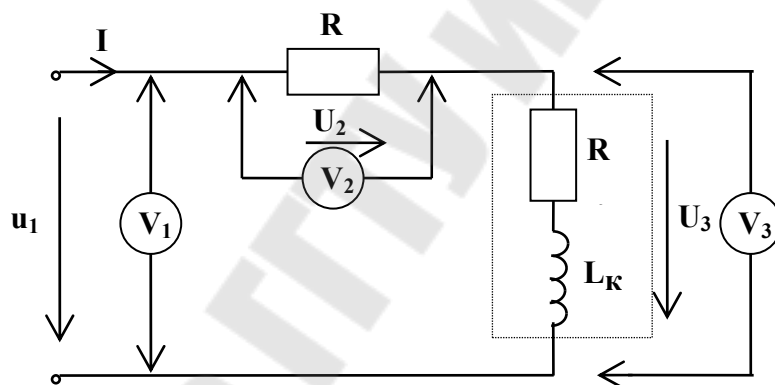


Рис.1.4

Сопротивление резистора R должно быть соизмеримо с полным сопротивлением Z реальной катушки. Напряжения U_1, U_2, U_3 измеряют поочередно одним вольтметром. По напряжению U_2 и сопротивлению R вычисляют ток

$$I = \frac{U_2}{R}.$$

Затем находят полные сопротивления катушки и всей цепи

$$Z_{\kappa} = \frac{U_3}{I}; Z = \frac{U_1}{I};$$

$$Z_{\kappa}^2 = R_{\kappa}^2 + X_{\kappa}^2; Z^2 = (R + R_{\kappa})^2 + X_{\kappa}^2.$$

Отсюда активное сопротивление катушки

$$R_{\kappa} = \frac{Z^2 - Z_{\kappa}^2 - R^2}{2R},$$

а реактивное сопротивление и индуктивность

$$X_{\kappa} = \sqrt{Z_{\kappa}^2 - R_{\kappa}^2}; L_{\kappa} = \frac{X_{\kappa}}{2\pi f}.$$

Результаты измерений и расчетов занесите в табл.1.4.

Таблица 1.4

Реальные катушки	Измерено			Вычислено						
	U ₁	U ₂	U ₃	I	Z	Z _κ	R _κ	X _κ	L _κ	φ _κ
	В	В	В	А	Ом	Ом	Ом	Ом	Гн	град
11										
12										

Сравните параметры R_κ, L_κ и угол φ_κ реальной катушки, определенные двумя методами и покажите для контроля преподавателю.

4. ВАХ конденсаторов и катушек снимают по схеме рис.1.3. Для этого увеличивая напряжение источника, начиная с нуля, производят четыре-пять измерений тока и напряжения на элементе. Ограничение - токи в катушках не должны превышать 100 мА.

Результаты измерений занесите в табл.1.5.

Таблица 1.5

N п/п	Конденсаторы				Реальные катушки			
	C=мкФ		C=мкФ		элемент 11		элемент 12	
	U	I	U	I	U	I	U	I
	В	А	В	А	В	А	В	А
1								
2								
...								
5								

По экспериментальным данным постройте ВАХ конденсаторов и индуктивных катушек и оцените их линейность.

5. Для снятия (внешней) ВАХ источника переменного напряжения необходимо собрать схему рис.1.5.

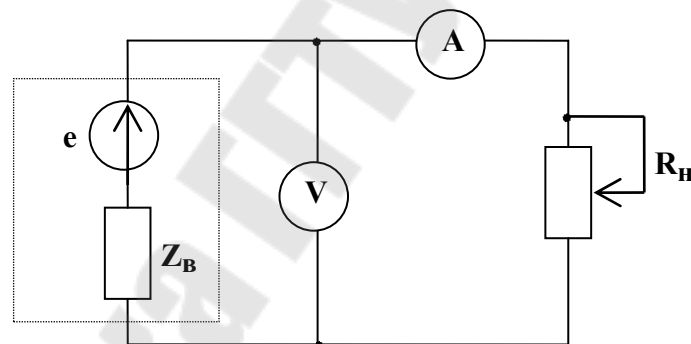


Рис.1.5

R_n - сопротивление БПС.

Внутреннее сопротивление источника Z_b считать активным. Если БПС отключить, то $I_A = 0$, т.к. входное сопротивление вольтметра велико и током в его входной цепи можно пренебречь. В этом случае вольтметр покажет напряжение холостого хода, численно равное ЭДС источника, т.е. $U_V = E$ (ЭДС устанавливают в пределах 10...15 В). Затем включают БПС с $R_{nmax} = 999$ Ом и уменьшают его величину, при этом ток в цепи будет возрастать, падение напряжения на внутреннем сопротивлении источника - увеличиваться, а на зажимах источника - уменьшаться. Уменьшая R_n , произведите 5...6

измерений тока и напряжения. Отклонение напряжения на источнике от значения E должно быть не менее $0,5$ В.

Результаты измерений занесите в табл. 1.6 и покажите преподавателю.

Таблица 1.6

N п/п	U	I	E	R_B
	В	А	В	Ом
1				
2				
...				

По экспериментальным данным табл.1.6 определите E и R_B .

6. Для определения разности фаз между током и напряжением на элементе используются электронные осциллографы С1-83 и С1-93, а также электронные фазометры Ф2-13.

Как известно, осциллографы позволяют наблюдать напряжение на элементе электрической цепи, но из-за большого входного сопротивления их нельзя включать последовательно с приемниками и, следовательно, нельзя непосредственно наблюдать форму тока. Поэтому для снятия кривой тока в соответствующую ветвь последовательно с исследуемым элементом включается добавочный резистор R_d (элемент 10). Напряжение с него, пропорциональное току, подается на второй вход осциллографа (рис.1.6).

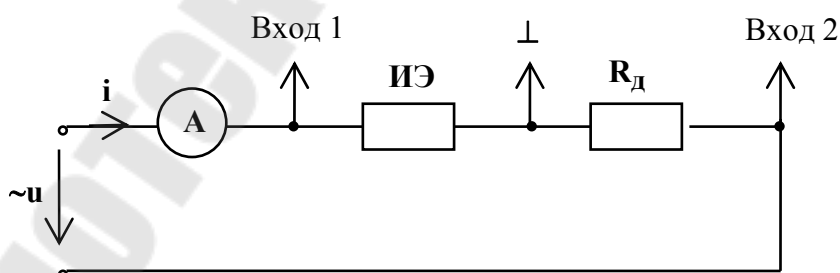


Рис.1.6

Конструкция осциллографа выполнена так, что его входы имеют общий потенциальный узел. Поэтому при измерениях необходимо учитывать, совпадают или не совпадают направления измеряемых напряжений. В последнем случае необходимо инвертировать наблю-

даемое напряжение, поступающее на «вход 2» соответствующей ручной осциллографу.

Результаты измерений занести в табл.1.7.

Таблица 1.7

Исследуемые элементы:	Резисторы		Конденсаторы		Катушки индуктивности	
	R....	R....	C....	C....	11	12
Разности фаз (град.)						

Сравните разности фаз, полученные на экране осциллографа, с расчетными. С экрана осциллографа зарисуйте три осциллограммы напряжения и тока: по одной для резистора, конденсатора и катушки индуктивности.

Контрольные вопросы

1. Какие напряжения (токи) называют гармоническими?
2. Что называют фазой переменного напряжения (тока), что принимают под понятием «начальная фаза»?
3. Нарисуйте три кривые переменного тока с начальными фазами $\psi_i > 0$, $\psi_i < 0$ и $\psi_i = 0$. Объясните, какие кривые являются опережающими и какие отстающими?
4. Каким образом экспериментально, с помощью осциллографа, определяют частоту напряжения переменного тока?
5. Назовите параметры пассивных элементов электрической цепи переменного тока и дайте их определение.
6. Как связаны между собой мгновенные значения напряжений и токов в сопротивлении, в индуктивности и в емкости?
7. Дайте определение действующего значения переменного тока и чему оно равно для синусоидального тока?
8. В чем сущность метода амперметра и вольтметра для определения параметров электрической цепи?
9. Как определяют параметры реальной катушки, используя источники постоянного и переменного токов?
10. Как определяют параметры реальной катушки методом трех вольтметров?
11. Как снимают ВАХ конденсаторов и катушек индуктивностей?

12. Объясните порядок снятия ВАХ источника переменного напряжения.
13. Каким образом экспериментально с помощью осциллографа определяют разность фаз между током и напряжением ?
14. Какими тремя величинами характеризуют синусоидально изменяющуюся функцию?
15. Каков смысл стрелки, указывающей положительное направление для тока ветви и напряжения на элементе цепи?
16. Поясните процесс прохождения синусоидального тока через индуктивную катушку.
17. Поясните процесс прохождения синусоидального тока через конденсатор.
18. Какое значение тока показывает амперметр, используемый в данной работе?

Расчетно-лабораторная работа N 2.3

Исследование цепи переменного тока с резистором и конденсатором

Цели работы:

1. Исследовать влияние активного сопротивления R , емкости C и частоты электрической цепи f источника напряжения на параметры и величину тока, мощности и разности фаз.
2. Проверить эквивалентность последовательной и параллельной схем замещения.

Программа работы

1. В цепи с последовательным соединением резистора и конденсатора снять зависимости тока I и разности фаз φ от величины :
 - а) активного сопротивления R резистора;
 - б) емкости C конденсатора;
 - в) частоты f напряжения источника.
2. По исходным данным п.1 рассчитать реактивное X_C и полное Z сопротивления цепи, активную P и реактивную Q мощности, а также разность фаз φ , соответствующие выбранным ранее значениям R , C и f .

Построить зависимости

$$Z = f_1(R), P = f_2(R), I = f_3(R), \varphi = f_4(R)$$

$$X_C = f_1(C), Z = f_2(C), Q = f_3(C), I = f_4(C), \varphi = f_5(C)$$

$$X_C = f_1(f), Z = f_2(f), P = f_3(f), Q = f_4(f), I = f_5(f), \varphi = f_6(f)$$

и сделать их анализ.

Графики строить с несколькими ординатными осями.

3. Для одного из измерений п.1 построить векторную диаграмму тока и напряжений, а также зарисовать осциллограммы напряжения и тока.
4. Проверить эквивалентность последовательной и параллельной схем замещения неразветвленной RC-цепи.

Краткие сведения из теории

Цепь переменного тока с включенными резистором и конденсатором можно представить как последовательное соединение активного сопротивления резистора R и реактивного емкостного сопротивления X_C конденсатора (рис.2.1,а).

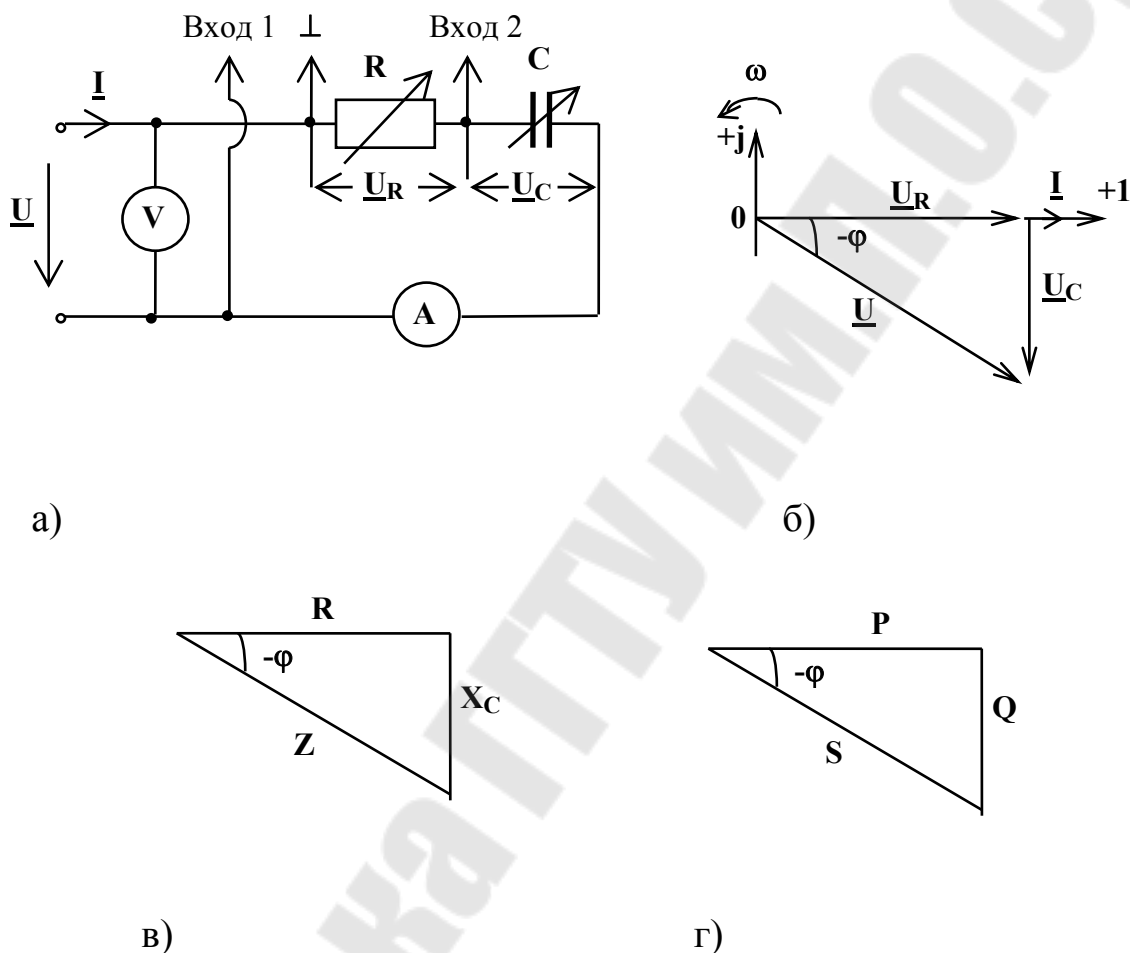


Рис.2.1

На рис.2.1 представлены: векторная диаграмма токов и напряжений (б), треугольник сопротивлений (в) и треугольник мощностей (г), с помощью которых легко вывести формулы для расчета последовательной RC-цепи.

Емкостное сопротивление
$$X_C = \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C}.$$

Полное сопротивление цепи $Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$,

ток в цепи $I = \frac{U}{Z}$,

тригонометрические функции угла сдвига фаз

$$\cos \varphi = \frac{R}{Z}, \sin \varphi = \frac{X_C}{Z}, \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_C}{R},$$

активная, реактивная и полная мощности цепи

$$P = UI \cos \varphi, Q_C = UI \sin \varphi, S = UI$$

$$P = R \cdot I^2, Q_C = X_C I^2, S = \sqrt{P^2 + Q^2}.$$

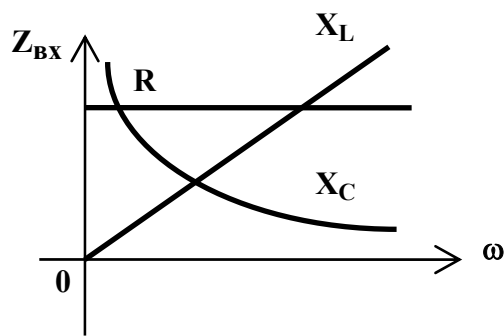
Под входной *частотной* характеристикой цепи (рис.2.1, а) понимают зависимость $\underline{Z}_{\text{вх}} = f(\omega)$, где $\underline{Z}_{\text{вх}} = R - jX_C$ - комплексное входное сопротивление. Характеристика $\underline{Z}_{\text{вх}} = f(\omega)$, в свою очередь, состоит из двух характеристик

$$Z_{\text{вх}} = f(\omega) \text{ и } \varphi_{\text{вх}} = f(\omega).$$

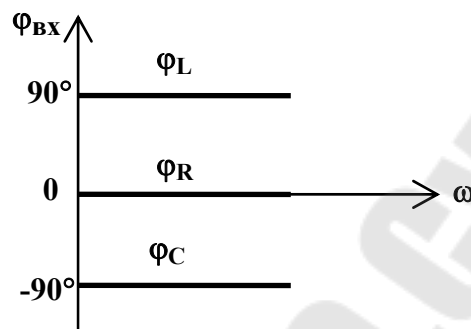
Характеристика $Z_{\text{вх}} = f(\omega)$, показывающая зависимость модуля входного сопротивления от частоты, называется входной *амплитудно-частотной* (АЧХ), а характеристика $\varphi_{\text{вх}} = f(\omega)$ - входной *фазо-частотной* (ФЧХ).

Для нахождения аналитического выражения $\underline{Z}_{\text{вх}} = f(\omega)$ необходимо записать комплексное входное сопротивление цепи по виду схемы, или подсчитать выражение $\underline{Z}_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх}}}$.

Для идеальных элементов RLC показаны на рис. 2.2 АЧХ (а) и ФЧХ (б).



а)



б)

Рис.2.2

В неразветвленной RC- цепи удобно использовать понятие : *граничная частота* ($\omega_{гр}$) , это частота, при которой $R = |X_C|$. Так как при

$\omega_{гр}$

$$R = \frac{1}{\omega_{gp} C} , \text{ то}$$

$$\omega_{gp} = \frac{1}{RC} .$$

АЧХ и ФЧХ для RC-цепи показаны на рис.2.3, а и б.

$$\underline{Z}_{ex} = R - j \frac{1}{\omega C} = R \left(1 - j \frac{1}{\omega RC} \right) = R \left(1 - j \frac{\omega_{gp}}{\omega} \right) .$$

$$Z_{ex} = R \sqrt{1 + \left(\frac{\omega_{gp}}{\omega} \right)^2} , \Phi_{ex} = -\text{arctg} \left(\frac{\omega_{gp}}{\omega} \right)$$

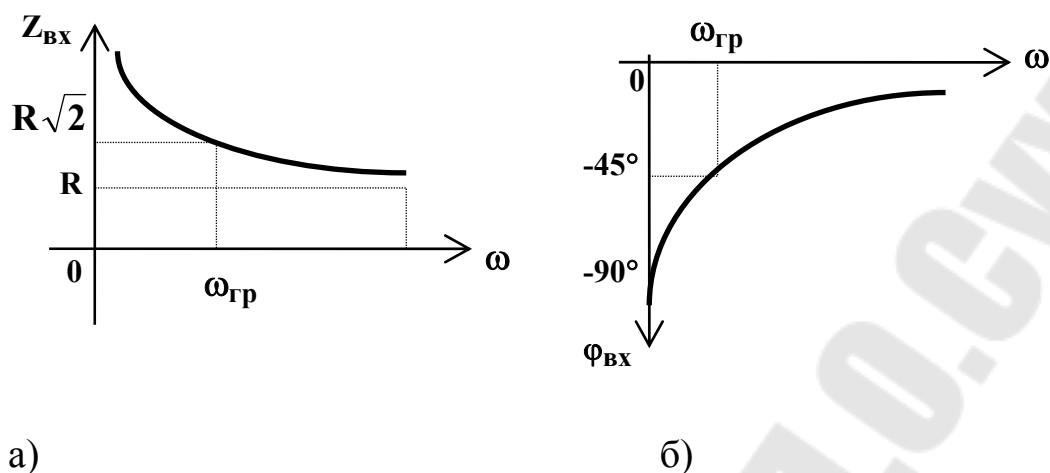


Рис.2.3

Пассивный двухполюсник (рис.2.4,а) может быть представлен двумя эквивалентными схемами. Первая схема представляет собой последовательное соединение активного и емкостного элементов (рис.2.4,б), вторая - параллельное соединение элементов с активной и реактивной проводимостями (рис.2.4, в) или с эквивалентными им активным и реактивным сопротивлениями (рис.2.4,г).

Если известны параметры первой схемы, то по ним можно определить параметры второй и наоборот.

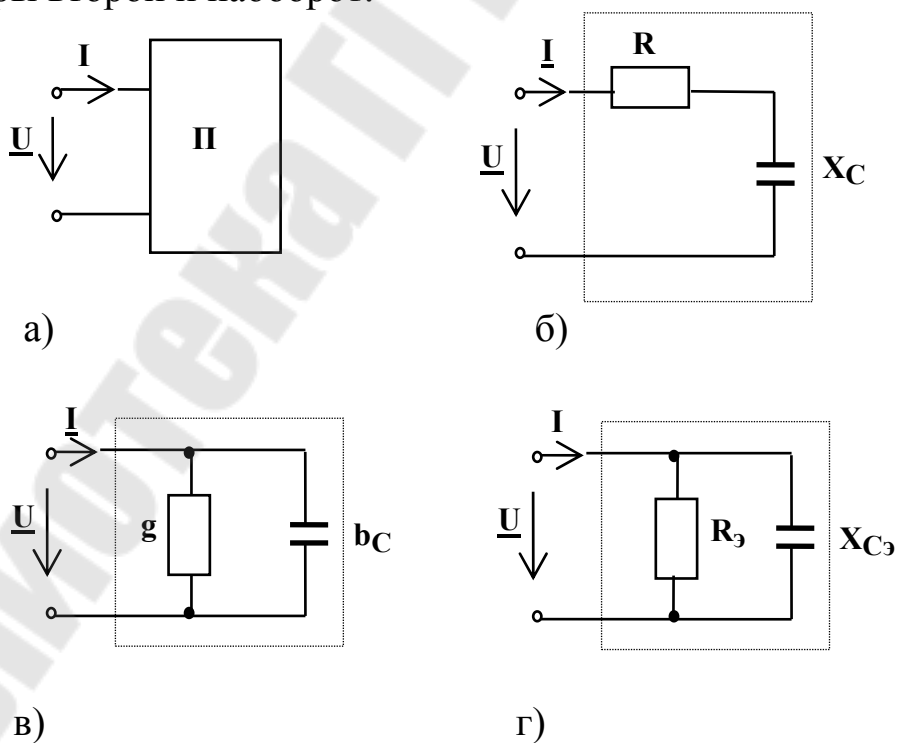


Рис.2.4

Пусть известно $\underline{Z} = R - jX_C$.

Тогда

$$\begin{aligned}\underline{Y} = \frac{1}{\underline{Z}} &= \frac{1}{R - jX_C} = \frac{(R + jX_C)}{(R - jX_C)(R + jX_C)} = \frac{R}{R^2 + X_C^2} + j \frac{X_C}{R^2 + X_C^2} = \\ &= g + j \cdot b,\end{aligned}$$

Так как в схеме рис.2.4,г имеются ветви с уединенными элементами, т.е., элементы, последовательно с которыми не соединено никаких других элементов, то проводимость такой ветви представляет величину, обратную сопротивлению этого элемента.

$g = \frac{1}{R_э}$ и $b = \frac{1}{X_{Cэ}}$, тогда

$$R_э = \frac{R^2 + X_C^2}{R}; X_{Cэ} = \frac{R^2 + X_C^2}{X_C} \quad (2.1)$$

Переход от одной схемы замещения к другой не изменяет величины напряжения и тока на входе пассивного двухполюсника. Равными также являются активные и реактивные мощности обеих схем.

Порядок и методика проведения исследований

В работе используются:

- регулируемый стабилизированный источник переменного напряжения (рис.2);
- блок переменных сопротивлений (БПС);
- блок переменной емкости БПЕ (рис.4);
- измерительные приборы и осциллограф, установленные на стенде.

1. Проведите необходимые предварительные расчеты по заданиям п.2,3,4,6 и заполните разделы «Вычислено» таблиц 2.1, 2.2, 2.3, 2.4.

2. Соберите на наборном поле электрическую цепь согласно схеме рис.2.1,а.. В качестве регулируемых резистора R и конденсатора C используйте БПС и БПЕ. Напряжение источника задайте произвольно в диапазоне 5...20 В и поддерживайте его неизменным в те-

чении эксперимента. Установите частоту напряжения источника в диапазоне 0,5...2 кГц.. Определите емкость конденсатора такой, чтобы его реактивное сопротивление X_C было в диапазоне 100...200 Ом . Изменяя сопротивление R в диапазоне $0,2X_C \leq R \leq 2X_C$ произведите пять-шесть измерений (через равные интервалы) тока I и разности фаз φ . Результаты измерений и расчетов занесите в табл.2.1 и представьте для контроля преподавателю.

Таблица 2.1

Исходные постоянные величины	№ п/п	R var Ом	Измерено		Вычислено		
			I А	φ град	Z Ом	P Вт	φ град
		U =В	1				
f =кГц	2						
C =мкФ	6						

3. Установите величину сопротивления R в диапазоне 100...200 Ом. При выбранной частоте в диапазоне 0,5...2 кГц определите пределы изменения емкости конденсатора C так, чтобы его сопротивление изменялось в диапазоне $0,2R \leq X_C \leq 2R$. Изменяя емкость C в выбранных пределах, произведите пять-шесть измерений (через равные интервалы, включая значение $X_C = R$) тока I и разности фаз φ . Результаты измерений и расчетов занесите в табл.2.2 и представьте для контроля преподавателю.

Таблица 2.2

Исходные постоянные величины	№ п/п	X_C var Ом	C var мкФ	Измерено		Вычислено			
				I А	φ град	Z Ом	X_C Ом	Q ВАр	φ град
		U =В	1						
f =кГц	2								
R =Ом	6								

4. Установите сопротивление R в диапазоне 100...150 Ом, а емкость конденсатора C выберите такой, чтобы при частоте источника $f = 1$ кГц сопротивление конденсатора было $X_C \approx 2R$. Увеличивая частоту f переключателем 6 (рис.2) до 5...6 кГц, измерить пять-шесть значений тока I и разности фаз φ . Результаты измерений и вычислений занесите в табл.2.3 и представьте для контроля преподавателю.

Таблица 2.3

Исходные постоянные величины	№ п/п	var f кГц	Измерено		Вычислено				
			I	φ	Z	X_C	P	Q	φ
			А	град	Ом	Ом	Вт	Вар	град
U =В	1								
R =Ом	2								
C =мкФ	6								

По данным таблиц 2.1,2.2,2.3 постройте указанные в п.2 программы работы расчетные и экспериментальные I, φ зависимости и сделайте их анализ.

5. Постройте векторную диаграмму и зарисуйте осциллограммы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ для случая, когда $R \approx X_C$. Определите разность фаз φ из векторной диаграммы и из осциллограммы и сравните их.
6. Проверку эквивалентности последовательной и параллельной схем замещения проведите для одного из измерений п.1 ($R \neq X_C$). Рассчитайте R_3 и C_3 по формулам (2.1). Соберите на наборном поле электрическую цепь по рис.2.4,г. Подайте на схему такое же напряжение, как и в п.1, измерьте ток и вычислите активную мощность. Данные расчетов и измерений занесите в табл.2.4.

Таблица 2.4

Схема замещения	R	C	R_3	C_3	U	I	P
	Ом	мкФ	Ом	мкФ	В	А	Вт
последовательная			X	X			
параллельная	X	X					

Контрольные вопросы

1. Чему равны полное комплексное и модуль полного сопротивления последовательного соединения конденсатора и резистора?
2. В каких пределах может изменяться разность фаз напряжения и тока для неразветвленной RC-цепи?
3. Постройте векторную диаграмму тока и напряжений для неразветвленной RC-цепи.
4. Что представляют собой треугольники сопротивлений и мощностей для неразветвленной RC-цепи.
5. Дайте определение входной частотной характеристики.
6. Какую зависимость называют АЧХ?
7. Какую зависимость называют ФЧХ?
8. Запишите выражение АЧХ для неразветвленной RC-цепи.
9. Запишите выражение ФЧХ для неразветвленной RC-цепи.
10. Постройте графики АЧХ и ФЧХ для неразветвленной RC-цепи.
11. Как определить параметры параллельной схем замещения зная параметры последовательной RC-цепи?
12. Как перейти от параметров параллельной схемы замещения RC-цепи к параметрам последовательной?
13. Чему равны комплексная и полная проводимости параллельного соединения RC-цепи?
14. Какие двухполюсники являются энергетически эквивалентными?
15. Объясните графические зависимости п.2 программы данной работы.

Расчетно-лабораторная работа N 2.4

Исследование цепи переменного тока с резистором и реальной катушкой

Цели работы:

1. Исследовать влияние индуктивности L и частоты f источника напряжения на параметры электрической цепи, величину тока, мощности и разности фаз.
2. Проверить эквивалентность последовательной и параллельной схем замещения.

Программа работы

1. В цепи с последовательным соединением резистора и реальной катушки снять зависимости тока I и разности фаз φ от величины:
 - а) индуктивности L реальной катушки;
 - б) частоты f напряжения источника.
2. По исходным данным п.1 рассчитать реактивное X_L и полное Z сопротивление цепи, активную P и реактивную Q мощности, а также разность фаз φ , соответствующие выбранным ранее значениям R, L, f .

Построить зависимости:

$$X_L = f_1(L), Z = f_2(L), Q = f_3(L), I = f_4(L), \varphi = f_5(L),$$

$$X_L = f_1(f), Z = f_2(f), P = f_3(f), Q = f_4(f), I = f_5(f), \varphi = f_6(f)$$

и сделать их анализ.

Графики строить с несколькими ординатными осями.

3. Для одного из измерений п.1 построить векторную диаграмму тока и напряжений, а также зарисовать осциллограммы напряжения и тока.
4. Проверить эквивалентность последовательной и параллельной схем замещения неразветвленной RL -цепи.

Краткие сведения из теории

Цепь переменного тока с включенными резистором и реальной катушкой можно представить как последовательное соединение ак-

тивного сопротивления резистора R , активного сопротивления меди проводов R_k и индуктивности L реальной катушки (рис.3.1,а).

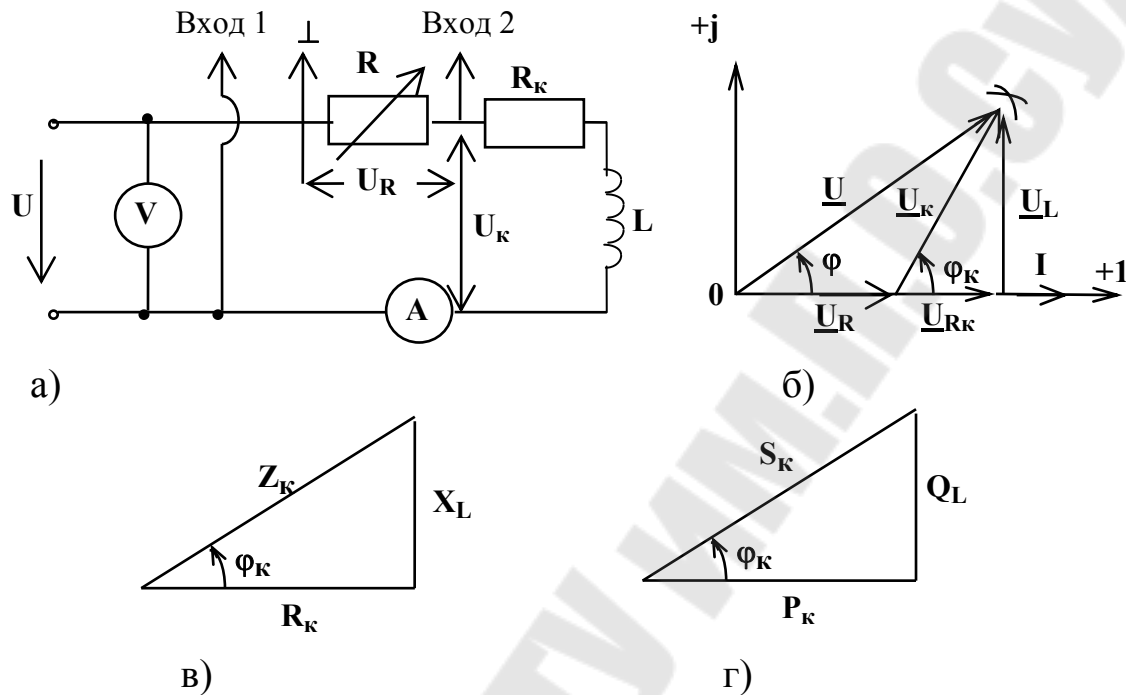


Рис.3.1

На рис.3.1 представлены: векторная диаграмма тока и напряжений RL -цепи (б), треугольник сопротивлений (в) и треугольник мощностей (г) реальной индуктивной катушки, с помощью которых легко вывести формулы для расчета последовательной RL -цепи.

Индуктивное сопротивление $X_L = \omega L = 2\pi fL$,

полное сопротивление цепи $Z = \sqrt{(R + R_k)^2 + X_L^2}$,

полное сопротивление реальной катушки $Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2}$,

ток в цепи $I = \frac{U}{Z}$.

Тригонометрические функции угла сдвига фаз для реальной катушки

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k}, \sin \varphi_k = \frac{X_L}{Z_k}, \operatorname{tg} \varphi_k = \frac{X_L}{R_k},$$

для всей цепи

$$\cos \varphi = \frac{R + R_k}{Z}, \sin \varphi = \frac{X_L}{Z}, \operatorname{tg} \varphi = \frac{X_L}{R + R_k},$$

активная, реактивная и полная мощности реальной катушки

$$P_k = U_k I \cos \varphi_k, Q_L = U_k I \sin \varphi_k, S_k = U_k I$$

$$P_k = R_k I^2, Q_L = X_L I^2, S_k = \sqrt{P_k^2 + Q_L^2}$$

Иногда вводят понятие добротности катушки $Q_k = \frac{U_L}{UR_k} = \frac{\omega L}{R_k}$.

активная, реактивная и полная мощности RL-цепи

$$P = UI \cos \varphi, Q_L = UI \sin \varphi, S = UI$$

$$P = (R + R_k) I^2, Q_L = X_L I^2, S = \sqrt{P^2 + Q_L^2}$$

В неразветвленной RL-цепи удобно использовать понятие граничная частота $\omega_{гр}$ (это частота, при которой $R = \omega_{гр} L$, откуда $\omega_{гр} = \frac{R}{L}$).

Так как в цепи рис.3.1,а

$$\underline{Z}_{ex} = R + R_k + j\omega L = (R + R_k) \left(1 + j \frac{\omega L}{R + R_k} \right) = (R + R_k) \left(1 + j \frac{\omega}{\omega_{гр}} \right),$$

то модуль входного сопротивления определяется из выражения

$$Z_{ex} = (R + R_k) \sqrt{1 + \left(\frac{\omega}{\omega_{гр}} \right)^2},$$

а входной фазный угол -

$$\varphi_{ex} = \arctg \frac{\omega}{\omega_{cp}}$$

Последовательную схему замещения реальной катушки (рис.3.3,а) можно заменить эквивалентной параллельной с активной и реактивной проводимостями (рис.3.2,б) или с эквивалентными им активным и реактивным сопротивлениями (рис.3.2,в).

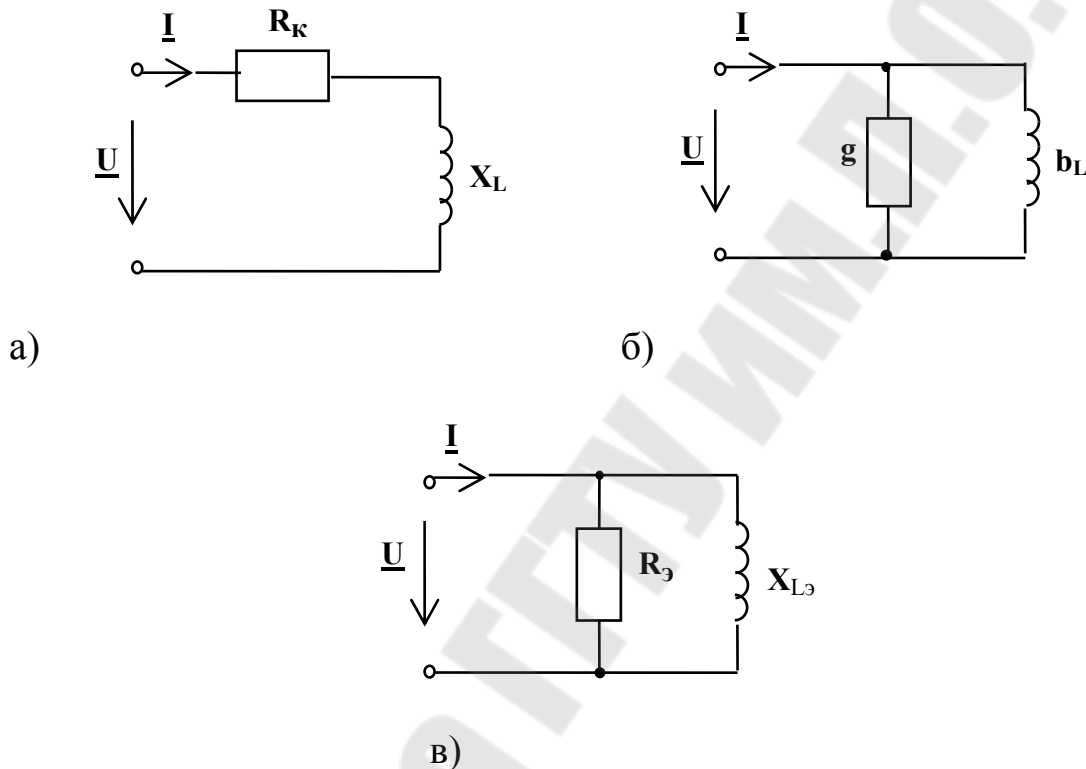


Рис.3.2

Если известны параметры первой схемы, то по ним можно определить параметры второй и наоборот.

Пусть известно $\underline{Z} = R_k + jX_L$, тогда

$$\begin{aligned} \underline{Y} &= \frac{1}{\underline{Z}} = \frac{1}{R_k + jX_L} = \frac{(R_k - jX_L)}{(R_k + jX_L)(R_k - jX_L)} = \frac{R}{R_k^2 + X_L^2} - j \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} = \\ &= g - jb_L \end{aligned}$$

Знак минус у мнимой составляющей проводимости указывает на ее индуктивный характер.

Величины эквивалентных сопротивлений схемы замещения рис.3.3,в будут

$$R_{\text{э}} = \frac{1}{g} = \frac{R_{\text{к}}^2 + X_L^2}{R_{\text{к}}}, \quad X_{L\text{э}} = \frac{1}{b_L} = \frac{R_{\text{к}}^2 + X_L^2}{X_L}. \quad (3.1)$$

Переход от одной схемы замещения к другой не изменяет величины напряжения и тока на входе электрической цепи.

Порядок и методика проведения исследований

В работе используются:

- регулируемый стабилизированный источник переменного напряжения (рис.2),
- индуктивные катушки (элементы 11 или 12),
- блок переменных сопротивлений (БПС),
- блок переменной индуктивности (БПИ, рис.4),
- измерительные приборы и осциллограф, установленные на стенде.

1. Соберите на наборном поле электрическую цепь согласно схеме рис.3.1,а. В качестве резистора R используйте БПС, а в качестве реальной катушки $R_{\text{к}} L$ -БПИ. Задайте величину R в пределах 20...40 Ом такой, чтобы ток при значении $L = 60 \dots 70$ мГн был равен 100 мА. Изменяя L до 10 мГн и поддерживая величину тока $I = 100$ мА, измерьте напряжение U источника постоянного тока. Результаты измерений занесите в таблицу 3.1 и проведите необходимые расчеты.

Таблица 3.1

Исходные постоянные величины	N п/п	L мГн	U В	В ы ч и с л е н о		
				$R_{\text{к}}+R$	$R_{\text{к}}$	$R_{\text{дк}}=R_{\text{кmax}}- R_{\text{кi}}$
				Ом	Ом	Ом
$I = 0,1$ А	1					
$R = ..$ Ом	2					
	.					
	.					
	7					

2. Установите, по заданию преподавателя, частоту напряжения источника переменного тока в диапазоне 300....1000 Гц. Подайте на схему рис.3.1,а напряжение переменного тока в диапазоне 5....20 В такой величины, чтобы ток при $L = 10$ мГн и $R_k + R_{dk} = R_{kmax}$ не превышал 200 мА, где обозначено: R_k - сопротивление катушки и R_{dk} - дополнительное сопротивление при $L = 10$ мГн, взять из таблицы 3.1. Напряжение необходимо поддерживать неизменным в течении всего эксперимента. Пределы изменения индуктивности катушки L от 10 до 70 мГн. В связи с тем, что при изменении индуктивности L реальной катушки меняется и величина R_k , то для поддержания постоянной величины $R_k + R$, необходимо изменять величину R . Изменяя индуктивность L в заданном диапазоне, проведите измерение тока I и разности фаз φ . Результаты измерений и расчетов занесите в таблицу 3.2 и представьте для контроля преподавателю.

Таблица 3.2

Исходные постоянные величины	№ п/п	var	var	Измерено		Вычислено			
		X_L	L	I	φ	Z	X_L	Q	φ
		Ом	Гн	А	град	Ом	Ом	ВАр	град
$U = \dots\dots В$ $f = \dots\dots Гц$ $R_k = \dots Ом$ $R_k + R = \dots Ом$	1 2 . . 6								

3. В электрическую цепь рис.3.1,а вместо R (БПС) и $R_k L$ (БПИ) включите одну из реальных индуктивных катушек (элемент 11 или 12). При частоте $f = 300....1000$ Гц напряжение источника установите таким, чтобы ток в цепи был не более 100 мА. Увеличивая частоту f переключателем б (рис.2) до 5...6 кГц, измерить 5..6 значений тока I и разность фаз φ . Результаты измерений и вычислений занесите в табл.3.3 и представьте для контроля преподавателю.

Таблица 3.3

Исходные постоянные величины	№ п/п	Var	Измерено		Вычислено				
		f	I	φ	Z	X_L	P	Q	φ
		Гц	А	град	Ом	Ом	Вт	ВАр	град

U =В	1							
R _к =Ом	2							
L =Гн	.							
	.							

По данным таблиц 3.2 и 3.3 постройте указанные в п.2 программы работы расчетные и экспериментальные зависимости и сделайте их анализ.

4. Постройте векторную диаграмму и зарисуйте осциллограммы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ для случая, когда $X_L \approx R_k$ и $X_L \approx R + R_k$. Определите разность фаз φ из векторной диаграммы и из осциллограммы и сравните их.
5. Проверку эквивалентности последовательной и параллельной схем замещения проведите для п.3 ($R_k \neq X_L$). Рассчитайте R_3 и L_3 по формулам (3.1). Соберите на наборном поле электрическую цепь по рис.3.3,в. Подайте на схему такое же напряжение, как и в п.3, измерьте ток и вычислите активную мощность. Данные расчетов и измерений занесите в табл.3.4.

Таблица 3.4

Схема замещения	R	L	R₃	L₃	U	I	P
	Ом	Гн	Ом	Гн	В	А	Вт
последовательная							
параллельная							

Контрольные вопросы

1. Чему равны полное комплексное и модуль полного сопротивления последовательного соединения резистора и реальной индуктивной катушки ?
2. Чем отличается реальная катушка от идеальной ?
3. В каких пределах меняется разность фаз напряжения и тока для неразветвленной RL - цепи ?
4. Что представляют собой треугольники сопротивлений и мощностей для неразветвленной RL -цепи ?

5. Запишите выражение АЧХ для неразветвленной RL -цепи.
6. Запишите выражение ФЧХ для неразветвленной RL -цепи.
7. Нарисуйте графики АЧХ и ФЧХ для неразветвленной RL-цепи.
8. Как определить параметры параллельной схемы замещения, зная параметры последовательной RL -цепи ?
9. Какие бывают схемы замещения и каковы условия их эквивалентности ?
10. Запишите выражение второго закона Кирхгофа для RL -цепи в дифференциальной и векторной формах.
11. Постройте векторную диаграмму напряжения и токов для параллельной схемы замещения .
12. Постройте треугольники проводимостей, токов и мощностей для параллельной схемы замещения.
13. Какова связь между параметрами эквивалентных схем замещения ?
14. Объясните характер зависимостей параметров реактивной катушки, тока и угла сдвига фаз между током и напряжением от индуктивности и частоты.
15. Какая частота называется граничной ? Как рассчитать граничную частоту в RL -цепи ?
16. Каковы значения модуля и аргумента входного сопротивления на граничной частоте?
17. Что такое добротность катушки и как ее определить ?

Расчетно-лабораторная работа N 2.5

Исследование цепи переменного тока с последовательно соединенными реальной катушкой и конденсатором (резонанс напряжений)

Цель работы: экспериментальное исследование электрического резонанса в последовательном колебательном контуре.

Программа работы

1. В электрической цепи с последовательным соединением RLC - элементов получить резонанс напряжений, предварительно рассчитав величины $C_{рез}$ и $f_{рез}$.
2. Построить векторные диаграммы тока и напряжений. Снять осциллограммы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$.
3. Снять и построить резонансные кривые $I(\omega)$, $U_k(\omega)$, $U_c(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ и зависимости $I(C)$, $U_k(C)$, $U_c(C)$ и $\varphi(C)$. Графики строить с несколькими ординатными осями.

Краткие сведения из теории

Рассмотрим последовательную RLC -цепь (рис.4.1,а), в которой протекает ток $i = I_m \sin \omega t$.

На основании второго закона Кирхгофа найдем напряжение, приложенное к цепи

$$u = u_R + u_L + u_C = RI + L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt$$

В комплексной форме для действующих значений тока и напряжений уравнение примет вид

$$\underline{U} = R \underline{I} + j\omega L \underline{I} - j \frac{1}{\omega C} \underline{I} = [R + j(X_L - X_C)] \underline{I} = (R + jX) \underline{I} = \underline{Z} \underline{I}$$

Здесь $X = X_L - X_C$ - реактивное сопротивление цепи,

$\underline{Z} = R + jX = Ze^{j\varphi}$ - комплексное сопротивление цепи, модуль которого $Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$, а аргумент $\varphi = \arctg \frac{X_L - X_C}{R}$.

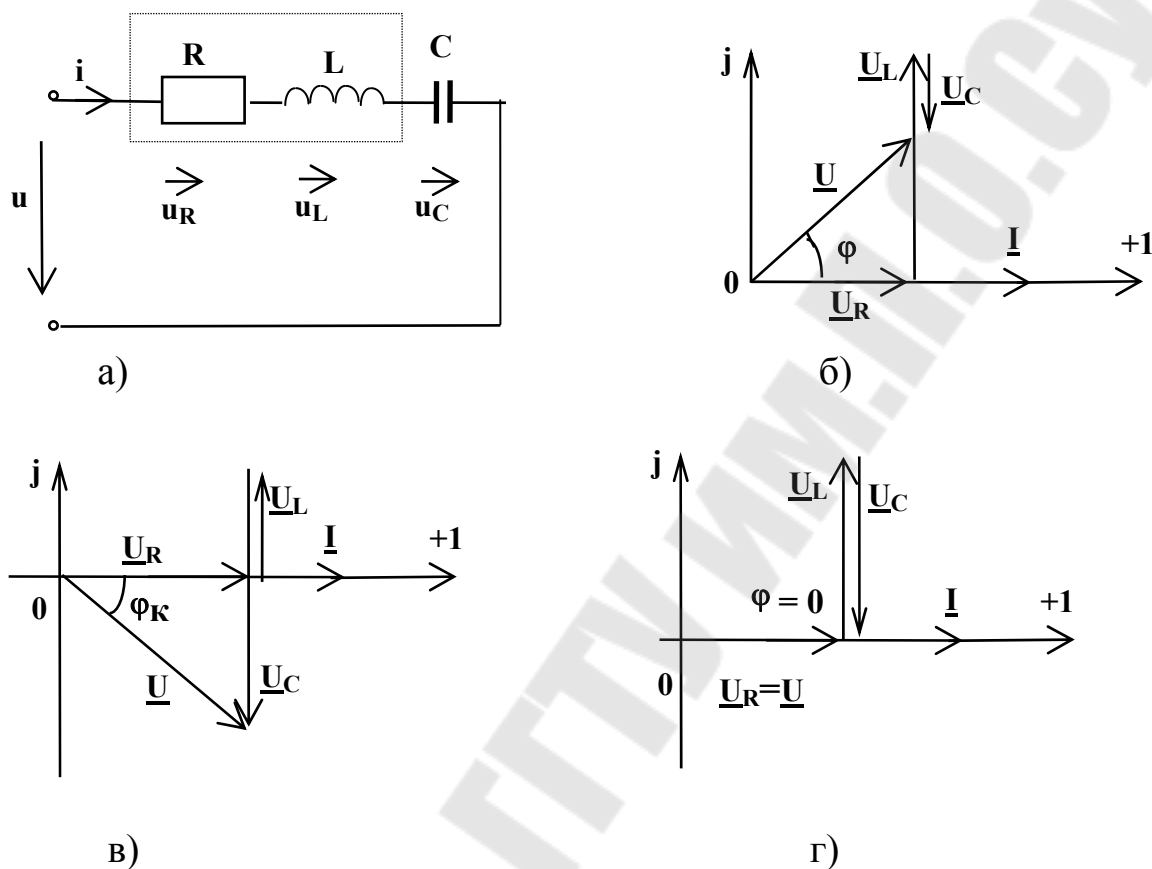


Рис. 4.1

Если $X_L > X_C$, то $\varphi > 0$ и векторная диаграмма напряжений имеет вид (рис.4.1,б). Если $X_L < X_C$, то $\varphi < 0$ (рис.4.1,в) и в случае $X_L = X_C$, $\varphi = 0$ - (рис.4.1,г), в цепи возникает особый режим, называемый электрическим резонансом. В этом режиме значения противоположных по фазе напряжений на индуктивности U_L и емкости U_C равны, поэтому резонанс в рассматриваемой цепи называют резонансом напряжений.

Рассмотрим частотные характеристики реактивных сопротивлений, входящих в цепь. Нанесем частотные характеристики этих сопротивлений на график и построим результирующую частотную характеристику (рис.4.2).

Из графика видно, что существует частота, при которой $X = 0$. Эта частота и является *резонансной*

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad \text{или} \quad f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

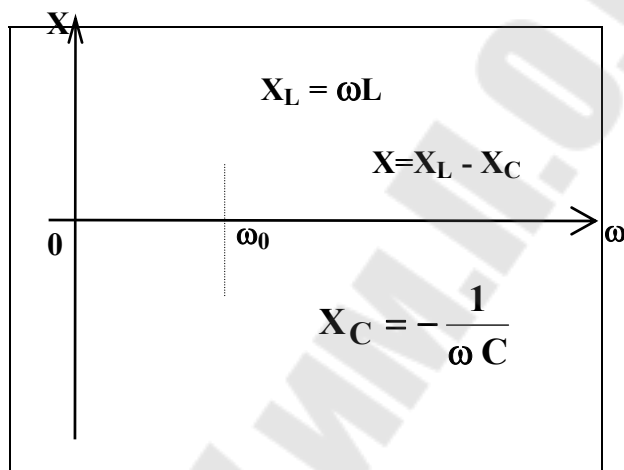


Рис.4.2

Индуктивное и емкостное сопротивление при резонансе $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$ называется *характеристическим* сопротивлением колебательного контура. В радиотехнике RLC -цепь называют *последовательным колебательным контуром*.

Полное сопротивление Z при $X = 0$ минимально, т.к. $Z = \sqrt{R^2 + X^2} = R$, а ток I при заданном напряжении U достигает наибольшего значения

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

Если $X_L = X_C \gg R$, то при резонансе напряжений $U_L = U_C \gg U$. Отношение напряжения на индуктивном или емкостном элементах к напряжению питания называют *добротностью* контура

$$Q = \frac{U_L}{U} = \frac{U_C}{U} = \frac{\rho}{R}.$$

Если резонанс достигается путем изменения емкости C при неизменном значении L и f , то ее величина определяется соотношением

$$C_{рез} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}.$$

Резонансные характеристики $I(\omega)$, $U_C(\omega)$, $U_L(\omega)$ и $\varphi(\omega)$ имеют вид (рис.4.3)

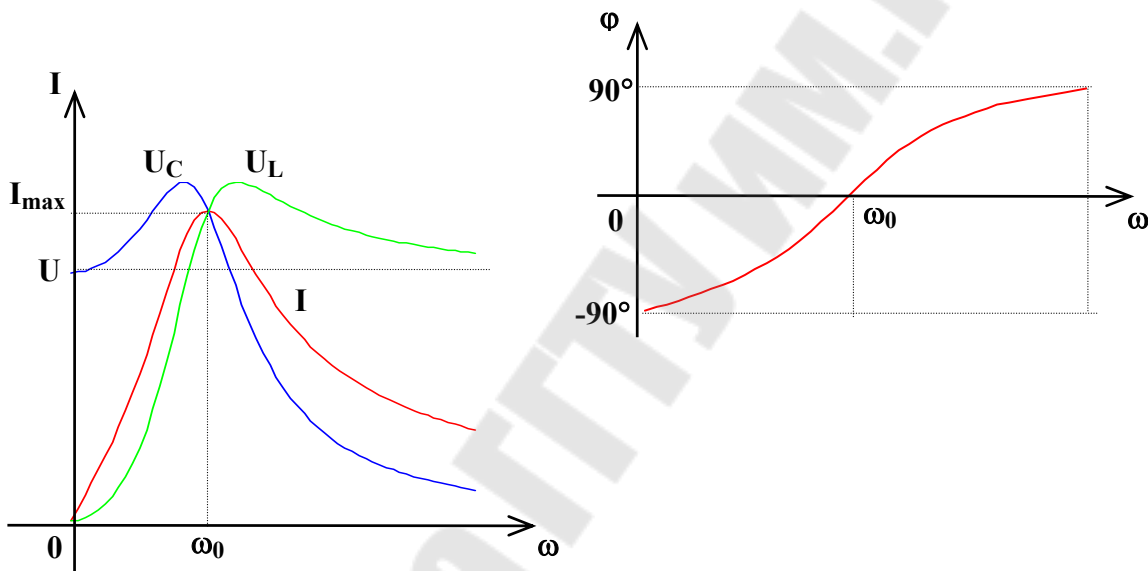


Рис.4.3

Порядок и методика проведения исследований

В работе используются :

- регулируемый источник переменного напряжения ($U = \text{var}$, $f = \text{var}$) рис.2,
- блок переменных сопротивлений (БПС),
- реальная катушка (элемент 11 или 12),
- блок переменных емкостей (БПЕ) рис.4,
- измерительные приборы и осциллограф, установленные на стенде.

1. Возьмите из набора элементов одну из реальных катушек индуктивности (элемент 11 или 12) с известными параметрами R_k и L_k (параметры определены в РЛР N 2.1) и при выбранной самостоятельно частоте источника переменного напряжения в диапазоне 300....1000 Гц рассчитайте емкость конденсатора, величины тока I и напряжений U_L , U_C , соответствующие режиму резонанса напряжений.

ВНИМАНИЕ!!! Ток при резонансе не должен превышать величину 100 мА при выполнении всех пунктов программы работы.

Для этой же катушки индуктивности и любого другого значения емкости конденсатора, отличающейся от рассчитанной ранее, определите резонансную частоту f_0 ($f_0 \leq 2$ кГц).

2. На наборном поле соберите электрическую цепь согласно рис.4.4.

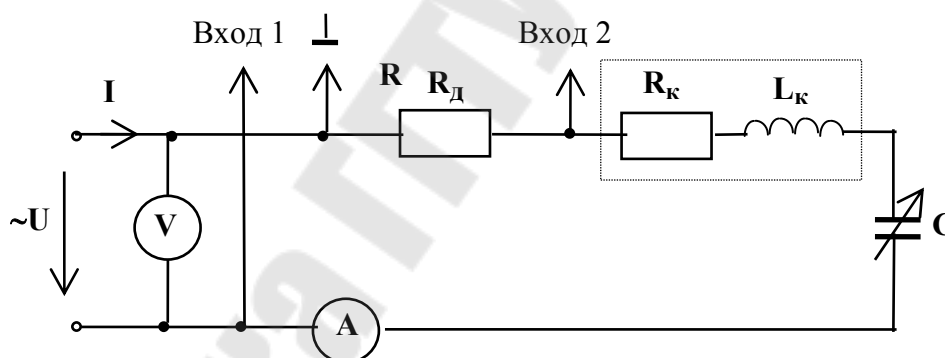


Рис.4.4

В качестве резистора R_d используйте элемент 10 или БПС ($R_d \leq 0,1 Z_k$), конденсатора - БПЕ. Величину напряжения источника задайте произвольно в диапазоне 5....15 В и поддерживайте неизменным в течении эксперимента. Установите с помощью БПЕ и дополнительных параллельно включенных конденсаторов C_1 , C_2 , C_3 (предварительно определив их величину методом амперметра и вольтметра), рассчитанную величину $C_{рез}$. Снимите и зарисуйте осциллограммы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ и определите разность фаз φ . Проведите

измерения величин тока и напряжений U_d , U_k , U_c , занесите в табл.4.1 и представьте для контроля преподавателю.

Таблица 4.1

Величины	I	U_d	U_k	U_c	φ	C_0	X_c	P
Ед.измерения	А	В	В	В	град	мкФ	Ом	Вт
Измерено								
Вычислено								
Исходные постоянные величины	$U = \dots \text{ В ; } f_0 = \dots \text{ Гц ; } R_k = \dots \text{ Ом ;}$ $L_k = \dots \text{ мГн}$							

3. Установите другую емкость конденсатора с помощью БПЕ для рассчитанной резонансной частоты f_0 (см.п.1). Проведите измерения величин аналогично п.2 и занесите в табл.4.2. Зарисуйте осциллограммы напряжений $u_d(t)$, $u_k(t)$, $u_c(t)$ и тока $i(t)$ и определите разность фаз φ . Представьте для контроля преподавателю.

Таблица 4.2

Величины	I	U_d	U_k	U_c	φ	C_0	X_c	P
Ед.измерения	А	В	В	В	град	мкФ	Ом	Вт
Измерено								
Вычислено								
Исходные постоянные величины	$U = \dots \text{ В ; } f_0 = \dots \text{ Гц ; } R_k = \dots \text{ Ом ;}$ $L_k = \dots \text{ мГн}$							

4. Поддерживая неизменным напряжение U , измерьте I , U_k , U_c и φ для 7 значений частот в диапазоне $0,5 \dots 1,5 f_0$ и занесите в табл.4.3. По полученным данным постройте резонансные кривые и зависимость $\varphi(\omega)$. Результаты представьте преподавателю.

Таблица 4.3

Исходные постоянные величины	N п/п	f	Измерено				Вычислено			
			I	U _к	U _с	φ	I	U _к	U _с	φ
			А	В	В	град	А	В	В	град
U = В ; C ₀ = мкФ	1 2 . 7	0,5f ₀ . 1,5f ₀								

5. Зависимости, аналогичные п.4, снимите, изменяя величину емкости (три значения меньше C₀ и три значения больше C₀). Результаты измерений занесите в табл.4.4 и постройте зависимости п.3 программы работы.

Таблица 4.4

Исходные постоянные величины	N п/п	C	Измерено			
			I	U _к	U _с	φ
			А	В	В	град
U = В ; C ₀ = ... мкФ; f = Гц	1 . 4 . 7	0,1C ₀ . C ₀ . 10C ₀				

Контрольные вопросы

1. Объясните, почему в RLC -цепи на резонансной частоте входное сопротивление цепи чисто активное?
2. От чего зависит резонансная частота в последовательной RLC -цепи?
3. Каковы условия возникновения резонанса напряжений?
4. Изменением каких параметров можно получить резонанс напряжений и как его достигают в данной работе?

5. С помощью каких приборов и по каким признакам можно судить о наступлении резонанса напряжений?
6. Что показывает добротность контура и как ее рассчитать по экспериментальным данным?
7. Как рассчитать действующее значение тока в последовательной RLC -цепи при известных ее параметрах и напряжении источника ?
8. От каких величин зависит значение угла сдвига фаз между напряжением и током в RLC -цепи?
9. Как рассчитать активную, реактивную и полную мощности последовательной RLC -цепи?
10. Дайте физическое толкование активной и реактивной мощностей.
11. Объясните построение векторных диаграмм для случаев $X_C < X_L$, $X_C = X_L$, $X_C > X_L$.
12. Объясните соотношение между напряжениями на реальной индуктивной катушке и конденсаторе при резонансе напряжений.
13. При каком условии значения напряжений на индуктивности и емкости могут превышать напряжение сети?
14. Чем может быть опасен резонанс напряжений?
15. Какое вы знаете практическое использование явления резонанса напряжений?
16. Нарисуйте входные АЧХ и ФЧХ для RLC -цепи.
17. Как изменяется модуль тока в RLC -цепи при изменении частоты?
18. Как определить напряжения на элементах R, RL, C и L при резонансе напряжений ?
19. Нарисуйте и объясните ход кривой $u_C = f(C)$ при $U = \text{const}$, $\omega = \text{const}$.
20. В каких пределах может изменяться разность фаз напряжения и тока при последовательной RLC -цепи?
21. Чему равны полное комплексное и модуль полного сопротивления последовательного соединения RLC -элементов?

Расчетно-лабораторная работа N 2.6

Исследование цепи переменного тока с параллельно соединенными элементами (резонанс токов)

Цели работы:

1. Экспериментальное исследование режимов цепи синусоидального тока при параллельном соединении ветвей;
2. Установление условий возникновения резонанса токов;
3. Повышение $\cos \varphi$ в цепях переменного тока.

Программа работы

1. В электрической цепи с параллельным соединением реальной катушки индуктивности и конденсатора с последовательно включенным с ним резистором получить резонанс токов.
2. Построить векторные диаграммы напряжения и токов. Снять и записать осциллограммы входного напряжения и тока.
3. Снять и построить зависимости $I(C)$; $Z(C)$; $Y(C)$; $\varphi(C)$ и $\cos \varphi(C)$. Графики строить с несколькими ординатными осями.
4. Определить емкость конденсатора для повышения $\cos \varphi$ электроустановки ($R_k L_k$).

Краткие сведения из теории

Рассмотрим электрическую цепь (рис.5.1,а), в которой две параллельные ветви с параметрами R_1L и R_2C подключены к источнику синусоидального напряжения $u = U_m \sin \omega t$.

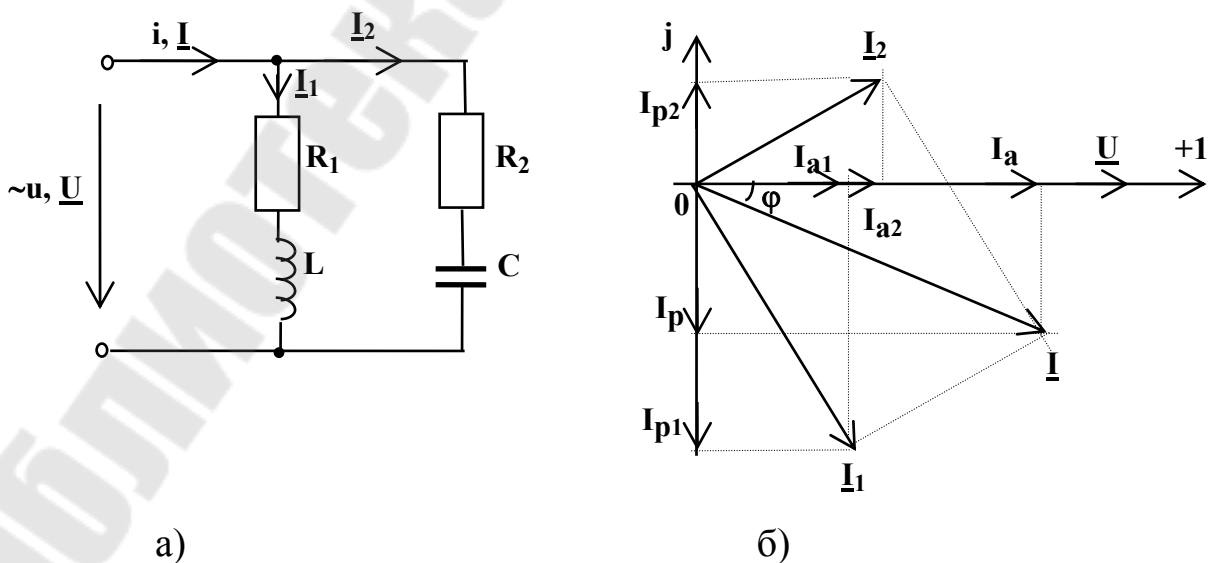


Рис.5.1

Такую цепь иногда называют *параллельным колебательным контуром*.

Токи в ветвях

$$i_1 = \frac{U_m}{\sqrt{R_1^2 + (\omega L)^2}} \sin(\omega t - \varphi_1), \quad i_2 = \frac{U_m}{\sqrt{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}} \sin(\omega t - \varphi_2),$$

где $\varphi_1 = \arctg \frac{\omega L}{R_1}$, $\varphi_2 = \arctg \frac{1}{\omega C R_2}$.

На входе цепи протекает ток $i = i_1 + i_2 = I_m \sin(\omega t - \varphi)$.

Запишем эти уравнения в комплексной форме для действующих значений синусоидальных величин с учетом нулевой начальной фазы напряжения

$$\underline{U} = U.$$

Комплексные сопротивления ветвей

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j\omega L = R_1 + jX_L = Z_1 e^{j\varphi_1},$$

$$\underline{Z}_2 = R_2 - j\frac{1}{\omega C} = R_2 + jX_C = Z_2 e^{-j\varphi_2}.$$

Комплексные проводимости ветвей

$$\underline{Y}_1 = \frac{1}{\underline{Z}_1} = \frac{1}{R_1 + jX_L} = \frac{R_1}{R_1^2 + X_L^2} - j\frac{X_L}{R_1^2 + X_L^2} = g_1 - jb_1 = Y_1 e^{-j\varphi_1},$$

$$\underline{Y}_2 = \frac{1}{\underline{Z}_2} = \frac{1}{R_2 - jX_C} = \frac{R_2}{R_2^2 + X_C^2} + j\frac{X_C}{R_2^2 + X_C^2} = g_2 + jb_2 = Y_2 e^{j\varphi_2},$$

где g_1 и g_2 - активные, а b_1 и b_2 - реактивные проводимости ветвей.

Токи в ветвях

$$\underline{I}_1 = \underline{U} \underline{Y}_1 = U g_1 - j U b_1 = I_{a1} - j I_{p1},$$

$$\underline{I}_2 = \underline{U} \underline{Y}_2 = U g_2 + j U b_2 = I_{a2} + j I_{p2},$$

где I_{a1} и I_{a2} - активные составляющие, а I_{p1} и I_{p2} - реактивные составляющие токов.

Эквивалентная комплексная проводимость цепи

$$\underline{Y} = \underline{Y}_1 + \underline{Y}_2 = (g_1 + g_2) - j(b_1 - b_2) = g - jb = Ye^{-j\varphi},$$

где $g = g_1 + g_2$, $b = b_1 - b_2$, $Y = \sqrt{g^2 + b^2}$, $\varphi = \arctg \frac{-(b_1 - b_2)}{g}$.

Ток на входе цепи

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = U\underline{Y} = Ie^{-j\varphi} = I_a - jI_p,$$

где $I_a = I_{a1} + I_{a2}$, $I_p = I_{p1} - I_{p2}$.

На рис.5.1,б представлена векторная диаграмма токов, построенная для случая, когда $I_{p1} > I_{p2}$. Если $I_{p1} = I_{p2}$, то $I_p = 0$ и ток \underline{I} совпадает по фазе с напряжением \underline{U} ($\varphi=0$). В цепи возникает резонансный режим, который обусловлен взаимной компенсацией реактивных составляющих токов I_{p1} и I_{p2} параллельных ветвей. Поэтому такой режим работы параллельного контура называют *резонансом токов*.

Условием возникновения резонанса токов является равенство нулю реактивной проводимости цепи

$$b = b_1 - b_2 = 0 \quad \text{или} \quad b_1 = b_2.$$

$$\frac{\omega L}{R_1^2 + (\omega L)^2} = \frac{1}{R_2^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}.$$

Изменением одной из величин (ω, R_1, R_2, L, C) при постоянных значениях остальных четырех, резонанс не всегда может быть получен. Он будет отсутствовать, если значение изменяемой величины при ее определении из последнего уравнения получится мнимым или комплексным. Найдем значение резонансной угловой частоты

$$\omega'_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{L}{C} - R_1^2}{\frac{L}{C} - R_2^2}} = \omega_0 \sqrt{\frac{\rho^2 - R_1^2}{\rho^2 - R_2^2}},$$

где $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ - резонансная угловая частота контура LC без потерь ($R_1=R_2=0$),

$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - *характеристическое* сопротивление контура.

Резонанс возможен, если R_1 и R_2 оба меньше или оба больше ρ . При невыполнении этого условия резонанс невозможен.

При $R_1=R_2$ $\omega'_0 = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$, т.е. такая же, как и при резонансе в последовательном колебательном контуре. Если $R_1 = R_2 = \rho$ - резонанс наблюдается при любой частоте.

При резонансе токов полная проводимость $Y=g$, т.е. минимальна и входное сопротивление $\underline{Z}_{\%0} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2}$ достигает максимума, поэтому ток будет минимальный

$$I_0 = U g,$$

активная мощность $\underline{P} = UI \cos \varphi = UI = S$

и реактивная $\underline{Q} = UI \sin \varphi = 0$.

Входное сопротивление большинства потребителей электрической энергии имеет активно-индуктивный характер. Для того, чтобы уменьшить потребляемый ими ток за счет снижения его реактивной составляющей и тем снизить потери энергии в генераторе и подводящих проводах, параллельно приемнику энергии включают батарею конденсаторов. Уменьшение сдвига фаз между напряжением на приемнике и током, потребляемым от генератора, называют *компенсацией сдвига фаз* или *повышением* $\cos \varphi$. Экономически выгодно подключать конденсаторы на возможно более высокое напряжение (ток через конденсаторы $I_C = U\omega C$). Сдвиг фаз между напряжением и током доводят до значения, при котором $\cos \varphi \approx 0,9 \dots 0,95$.

На рис.5.2,а показана эквивалентная схема потребителя и батареи конденсаторов, а на рис.5.2,б - ее векторная диаграмма.

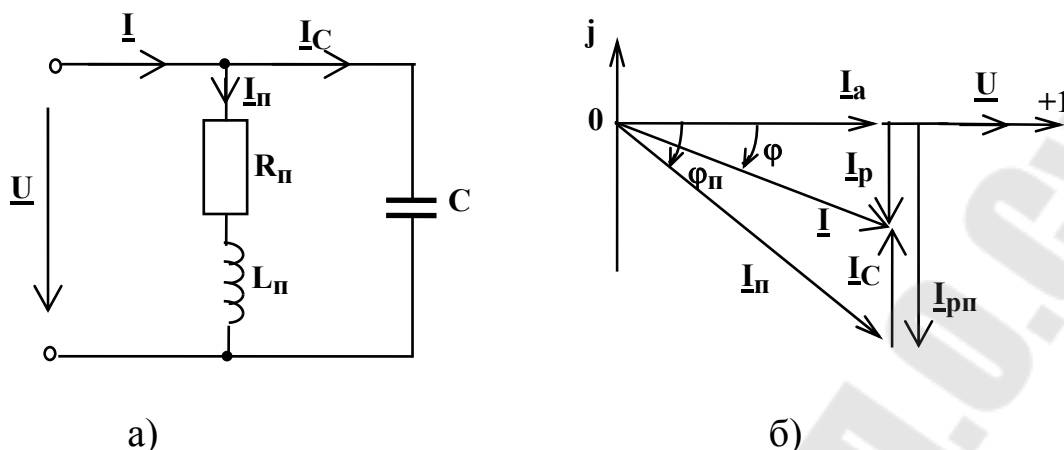


Рис.5.2

Из диаграммы видно, что для получения угла сдвига фаз требуемой величины φ ток через емкость должен быть

$$I_C = I_{pн} - I_p,$$

где $I_{pн} = I_a \operatorname{tg} \varphi_n$ и $I_p = I_a \operatorname{tg} \varphi$.

Ток I_C можно выразить через напряжение и емкость $I_C = U\omega C$, а ток I_a - через мощность и напряжение $I_a = \frac{P_n}{U}$.

Тогда искомое значение емкости батареи конденсаторов

$$C = \frac{P_n}{\omega U^2} (\operatorname{tg} \varphi_n - \operatorname{tg} \varphi),$$

где: P_n - активная мощность потребителя,
 φ_n - угол сдвига фаз потребителя до компенсации,
 φ - требуемый угол сдвига фаз после компенсации.

Порядок и методика проведения исследований

В работе используются:

- регулируемый источник переменного напряжения ($U=\text{var}$, $f=\text{var}$) рис.2,

- блок переменных сопротивлений (БПС),
- реальная катушка (элементы 11 или 12),
- блок переменных емкостей (БПЕ) рис.4,
- резисторы (элементы 01....10),
- измерительные приборы и осциллограф, установленные на стенде.

1. Выберите из набора элементов одну из реальных катушек индуктивности (элемент 11 или 12) с известными параметрами R_k и L_k (параметры определены в РЛР N 2.1) и при выбранной самостоятельно частоте источника переменного напряжения в пределах 0,3....2 кГц рассчитайте емкость конденсатора C_0 , при которой в параллельном контуре возникает резонанс токов. Вычислите также величину общего тока I и токи, протекающие через катушку и конденсатор, задаваясь напряжением источника в диапазоне 10...20 В. Величина сопротивления $R \approx 0,5 X_C$.

2. На наборном поле соберите электрическую цепь согласно рис.5.3.

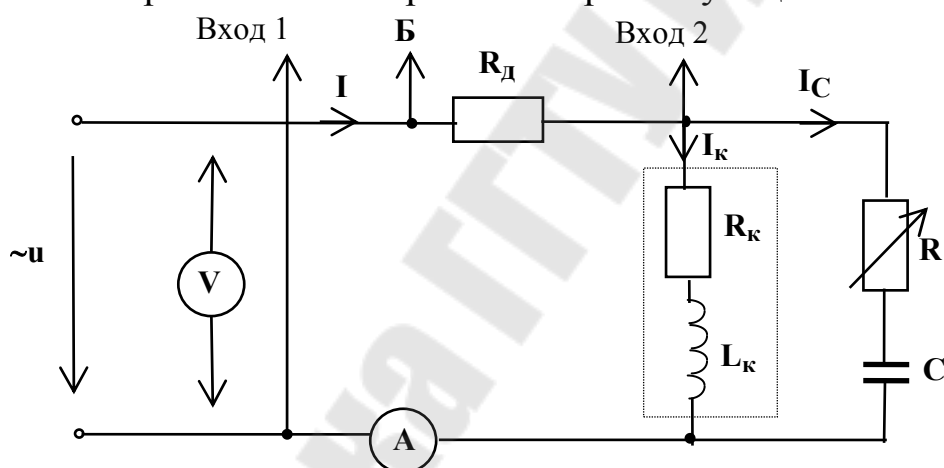


Рис.5.3

В качестве резистора R_d используйте элемент 10, в качестве R - БПС, а конденсатора C - БПЕ. Величину напряжения задайте равной взятому для расчета в п.1 и поддерживайте его неизменным в течении эксперимента. Установите с помощью БПЕ и дополнительных параллельно-включенных конденсаторов C_1, C_2, C_3 (расположены рядом с БПЕ в одном блоке) рассчитанную в п.1 величину C_0 . Проведите измерения величины напряжения и токов I, I_k, I_C , зарисуйте осциллограммы напряжения $u(t)$ и тока $i(t)$ и определите

разность фаз φ . Результаты вычислений п.1 и измерений п.2 занесите в табл.5.1 и представьте для контроля преподавателю.

Таблица 5.1

Величины	I	I _к	I _с	φ	X _с	C ₀	P
Ед.измерения	А	А	А	град	Ом	мкФ	Вт
Вычислено							
Измерено							
Исходные постоянные величины	$U = \dots\dots\dots В ; f = \dots\dots Гц ; R_k = \dots\dots Ом$ $L_k = \dots\dots Гн ; R_d = \dots\dots Ом ; R = \dots\dots Ом$						

По результатам вычислений и эксперимента постройте векторные диаграммы токов и напряжений.

3. Поддерживая неизменным напряжение U , измерьте общий ток I и сдвиг фаз φ для 7 значений емкости в диапазоне $0,1C_0 \dots 5 C_0$ и занесите результат вычислений и эксперимента в табл.5.2.

Таблица 5.2

Исходные постоянные величины	N п/п	C ₀	Вычислено		Измерено	
			I	φ	I	φ
		мкФ	А	град	А	град
$U = \dots\dots\dots В ;$ $f_0 = \dots\dots Гц ;$ $R_k = \dots\dots Ом ;$ $L_k = \dots\dots Гн ;$ $R_d = \dots\dots Ом ;$ $R = \dots\dots Ом$	1	0,1C ₀				
	2	.				
	.	.				
	.	.				
	.	.				
	6	.				
	7	5 C ₀				

По полученным данным постройте резонансные кривые $I(C)$ (расчетную и экспериментальную) и зависимости $\varphi(C)$.

4. Для одной из реальных катушек (элемент 11 или 12) рассчитайте емкость конденсатора, который необходимо включить параллельно катушке, чтобы повысить $\cos \varphi$ электрической цепи (рис.5.2,а) до значения 0,9...0,95 (величину выбрать самостоятельно). Проверьте расчетные значения $\cos \varphi$ экспериментально, измерив угол φ в

схеме рис.5.2,а (для наблюдения тока необходимо дополнительно включить R_d).

Контрольные вопросы

1. Объясните, почему на резонансной частоте входное сопротивление чисто активное в цепи с параллельно соединенными RL и RC ветвями ?
2. От чего зависит резонансная частота в параллельном колебательном контуре ?
3. Каковы условия возникновения резонанса токов ?
4. Изменением каких параметров можно получить резонанс токов и как его достигают в данной работе ?
5. С помощью каких приборов и по каким признакам можно судить о наступлении резонанса токов ?
6. Как рассчитать действующее значение общего тока в цепи с параллельным соединением RL и RC элементов при известных ее параметрах и напряжении источника ?
7. Объясните построение векторных диаграмм для случаев $b_L > b_C$, $b_L = b_C$ и $b_L < b_C$.
8. При каком условии значения токов через реальную катушку и емкость при их параллельном соединении могут превышать общий ток ?
9. Опасен или нет резонанс токов для электрической цепи ?
10. Какое вы знаете практическое использование явления резонанса токов ?
11. Нарисуйте входные АЧХ и ФЧХ параллельного колебательного контура.
12. Нарисуйте и объясните ход кривой $I(C)$.
13. В каких пределах может изменяться разность фаз напряжения и общего тока параллельного колебательного контура ?
14. Получите выражение резонансной частоты для параллельного соединения RL и RC ветвей.
15. Запишите расчетные формулы для определения проводимостей RL и RC ветвей.
16. Что такое частотные характеристики ?
17. Что такое коэффициент мощности ? Каков его физический смысл ?
18. К чему приводит низкий коэффициент мощности и зачем его повышать?

19. Каковы способы повышения коэффициента мощности?
20. Как рассчитать величину компенсирующей емкости для повышения коэффициента мощности до заданного значения?

Расчетно-лабораторная работа N 2.7

Расчет и экспериментальная проверка линейной электрической цепи переменного тока

Цели работы:

1. Применение символического метода расчета разветвленных электрических цепей синусоидального тока.
2. Приобретение навыков экспериментального исследования таких цепей.

Программа работы

1. Рассчитать разветвленную электрическую цепь в соответствии с заданием символическим методом.
2. Произвести проверку результатов расчета по п.1 путем:
 - составления баланса мощностей;
 - построения векторных диаграмм (лучевой токов и топографической напряжений);
3. Собрать исследуемую электрическую цепь на лабораторном стенде.
4. Измерить токи во всех ветвях цепи и сравнить их с расчетными значениями.
5. Измерить потенциалы точек цепи и сравнить их с расчетными значениями.

Краткие сведения из теории

Сущность символического метода расчета состоит в том, что при синусоидальном токе можно перейти от уравнений, составленных для мгновенных значений и являющихся *дифференциальными* уравнениями, к *алгебраическим* уравнениям, составленным относительно комплексов тока и ЭДС. Этот переход основан на том, что в уравнениях, составленных по законам Кирхгофа для установившегося процесса, мгновенное значение тока i заменяют комплексом тока \underline{I} ; мгновенное значение напряжения на резисторе R_i - комплексом $R_i \underline{I}$, по фазе совпадающим с током \underline{I} ; мгновенное значение напряжения на индуктивной катушке $u_L = L \frac{di}{dt}$ - комплексом $j\omega L \underline{I}$, опережающим ток на 90° ; мгновенное значение напряжения на конденсаторе

$u_C = \frac{1}{C} \int i dt$ - комплексом $\left(-j \frac{1}{\omega C} I \right)$, отстающим от тока на 90° ;

мгновенное значение ЭДС e - комплексом \underline{E} .

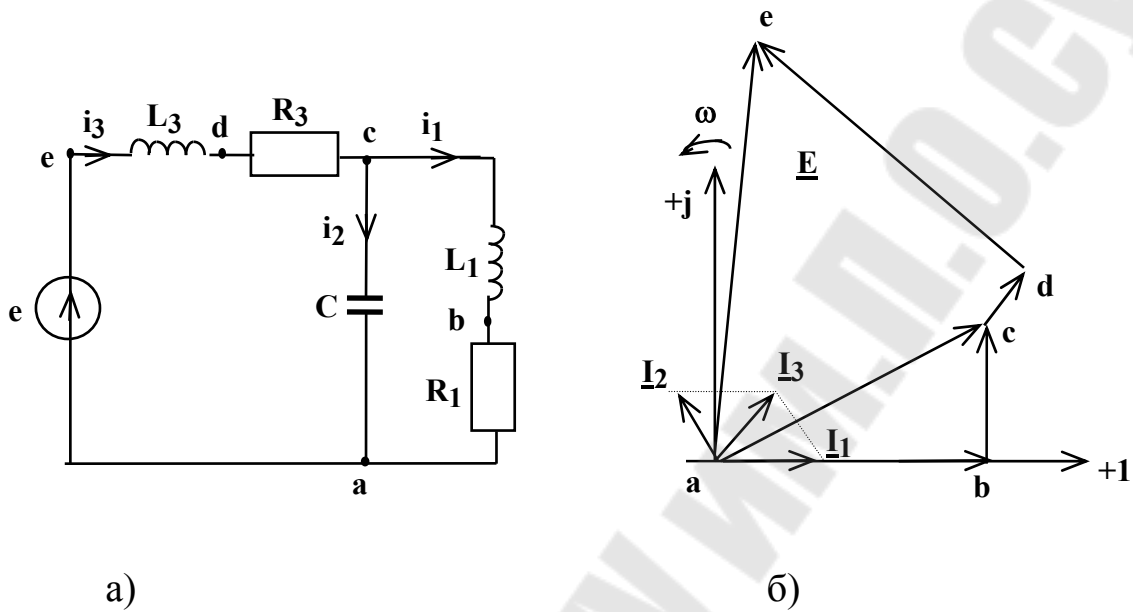


Рис.6.1

Например, для схемы рис.6.1,а уравнения, составленные по законам Кирхгофа для мгновенных значений можно записать так

$$\begin{cases} i_3 = i_1 + i_2; \\ L_3 \frac{di_3}{dt} + R_3 i_3 + \frac{1}{C} \int i_2 dt = e; \\ L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1 - \frac{1}{C} \int i_2 dt = 0 \end{cases}$$

Запишем их в комплексной форме

$$\begin{cases} \underline{I}_3 = \underline{I}_1 + \underline{I}_2; \\ \underline{I}_3(j\omega L_3 + R_3) - \underline{I}_2 j \frac{1}{\omega C} = \underline{E}; \\ \underline{I}_1(j\omega L_1 + R_1) + \underline{I}_2 j \frac{1}{\omega C} = 0 \end{cases}$$

Решая эту систему алгебраических уравнений, определяют комплексы токов \underline{I}_1 , \underline{I}_2 , \underline{I}_3 .

Метод называют *символическим* потому, что токи и напряжения заменяют их комплексными изображениями или символами.

На этом основании все известные *методы расчета* цепей постоянного тока *применимы* для расчета цепей синусоидального тока.

Аналитические расчеты электрических цепей синусоидального тока сопровождаются построением *векторных диаграмм*, чтобы иметь возможность качественно контролировать эти расчеты.

Качественный контроль заключается в сравнении направлений различных векторов на комплексной плоскости, которые получают при аналитическом расчете, с направлением этих векторов, исходя из физических соображений. Например, на векторной диаграмме (рис.6.1,б) напряжение \underline{U}_{cb} должно опережать ток \underline{I}_1 на 90° , напряжение \underline{U}_{ac} - отставать от тока \underline{I}_2 , а напряжение \underline{U}_{de} - опережать ток \underline{I}_3 и т.д.

Если аналитический расчет дает результаты, не совпадающие с такими очевидными положениями, то, следовательно, в него вкралась ошибка.

Потенциалы точек электрической цепи переменного тока являются комплексными числами. На рис.6.2,а представлены два вектора, изображающие собой комплексные потенциалы

$$\underline{\varphi}_a = -2 + 5j \quad \text{и} \quad \underline{\varphi}_b = 4 + j$$

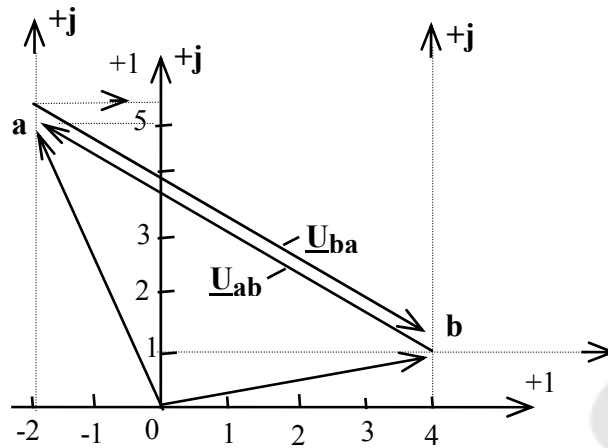


Рис.6.2

По определению, разность потенциалов

$$\underline{\varphi}_a - \underline{\varphi}_b = \underline{U}_{ab} = (-2 + 5j) - (4 + j) = -6 + 4j$$

изобразится вектором напряжения, направленным от b к a . Первый индекс у напряжения указывает, к какой точке следует направить стрелку вектора напряжения, а второй индекс совмещается с началом координат.

Разность потенциалов

$$\underline{\varphi}_b - \underline{\varphi}_a = \underline{U}_{ba} = (4 + j) - (-2 + 5j) = 6 - 4j ,$$

т.е. $\underline{U}_{ab} = -\underline{U}_{ba} .$

Совокупность точек комплексной плоскости, изображающих комплексные потенциалы одноименных точек электрической схемы, называют *топографической диаграммой*. Термин «топографическая» объясняется тем, что диаграмма напоминает топографическую карту местности, где каждой точке местности отвечает определенная точка карты.

При построении топографической диаграммы потенциал любой точки схемы может быть принят равным нулю. На диаграмме эту точку помещают в начало координат. Построим топографическую диаграмму для электрической цепи рис.6.1,а. Примем потенциал точки a равным нулю: $\varphi_a=0$. Выразим потенциал точки b через потенциал точки a

$$\underline{\varphi}_b = \underline{\varphi}_a + R_1 \underline{I}_1 .$$

Знак «+» перед слагаемым $R_1 \underline{I}_1$ обусловлен тем, что при переходе от точки а к точке в перемещение происходит навстречу току \underline{I}_1 (при этом потенциал точки в увеличивается на величину $R_1 \underline{I}_1$).

Аналогично определим потенциалы остальных точек

$$\underline{\varphi}_c = \underline{\varphi}_b + j\omega L_1 \underline{I}_1; \quad \underline{\varphi}_d = \underline{\varphi}_c + R_3 \underline{I}_3; \quad \underline{\varphi}_e = \underline{\varphi}_d + j\omega L_3 \underline{I}_3 .$$

Совокупность точек а, в, с, d, е на комплексной плоскости представляет собой топографическую диаграмму.

Для проверки правильности расчета электрической цепи составляют *баланс мощностей*. Сумма всех отдаваемых источниками (активных и реактивных) мощностей равна сумме всех потребляемых приемниками (активных и реактивных) мощностей, т.е.

$$\sum \tilde{S}_{уст} = \sum \underline{E} \underline{I}^* = \sum P_{уст} + j \sum Q_{уст} ;$$

$$\sum P_{уст} = \sum EI \cos \varphi = \sum I_{прi}^2 R_i ;$$

$$\begin{aligned} \sum Q_{уст} &= \sum EI \sin \varphi = \sum Q_{L,пр} - \sum Q_{C,пр} = \\ &= \sum I_{прi}^2 X_{Li} - \sum I_{прi}^2 X_{Ci} \end{aligned}$$

Для схемы рис.6.1,а баланс мощностей запишется так

$$\underline{E} \underline{I}_3^* = EI_3 \cos \varphi + jEI_3 \sin \varphi;$$

$$EI_3 \cos \varphi = R_1 I_1^2 + R_3 I_3^2;$$

$$EI_3 \sin \varphi = \omega L_3 I_3^2 + \omega L_1 I_1^2 - \frac{1}{\omega C} I_2^2;$$

$$\delta_p \% = \frac{P_{ист} - P_{пр}}{0,5(P_{ист} + P_{пр})} 100 \leq 3\%;$$

$$\delta_Q \% = \frac{Q_{\text{ист}} - Q_{\text{пр}}}{0,5(Q_{\text{ист}} + Q_{\text{пр}})} 100 \leq 3\%$$

Порядок и методика проведения исследований

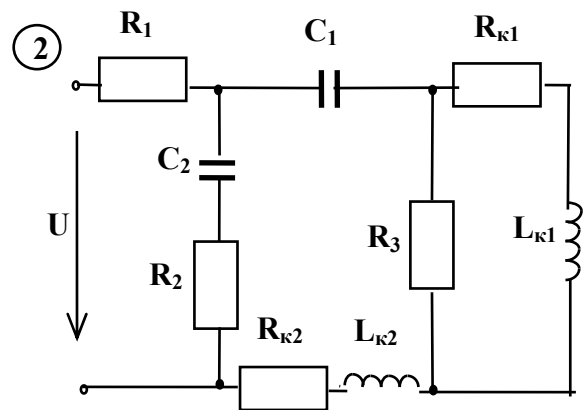
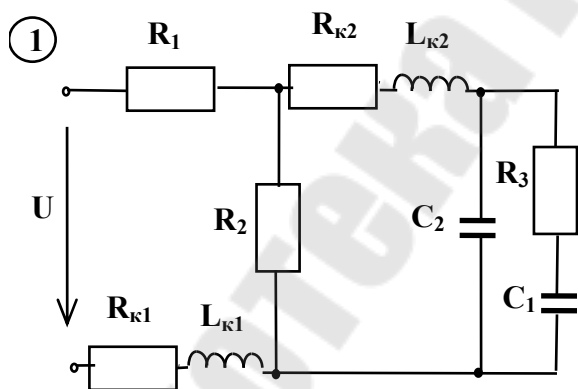
Перед выполнением работы каждый студент (бригада) получает индивидуальное, отличное от других, задание.

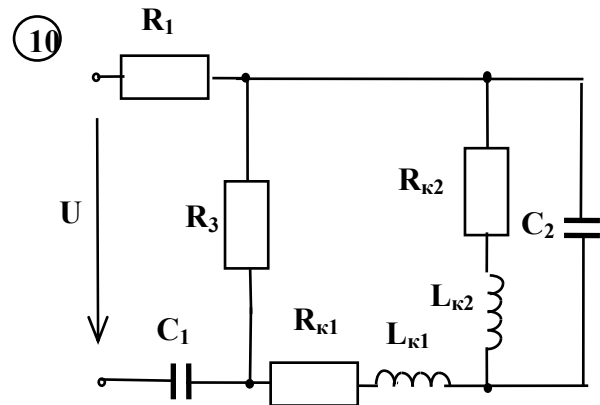
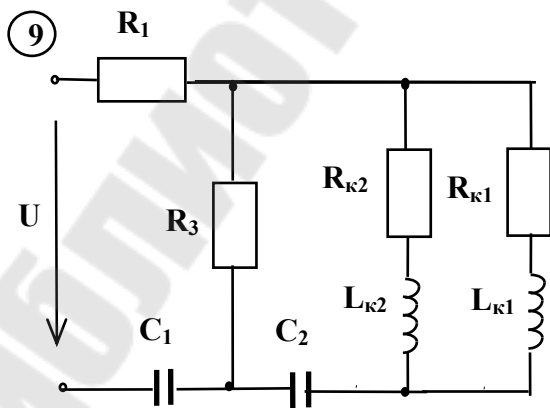
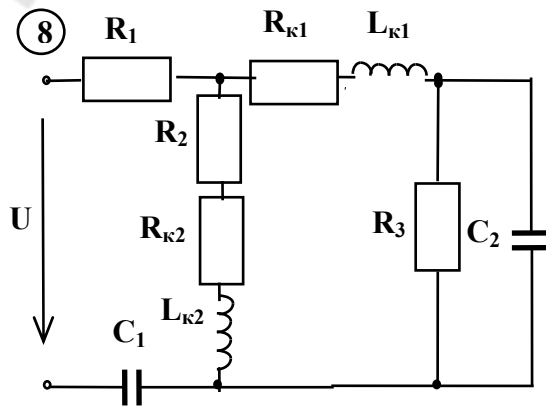
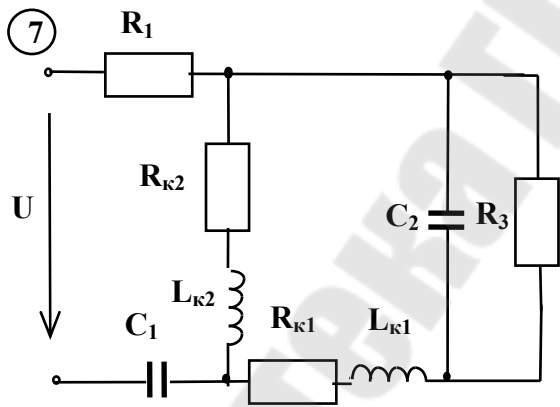
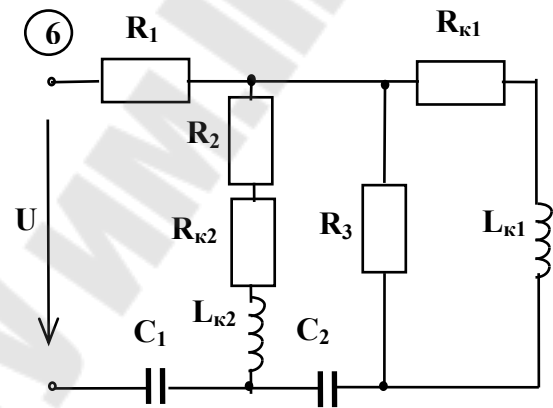
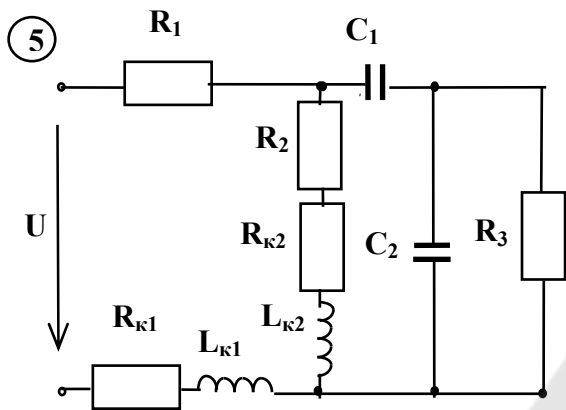
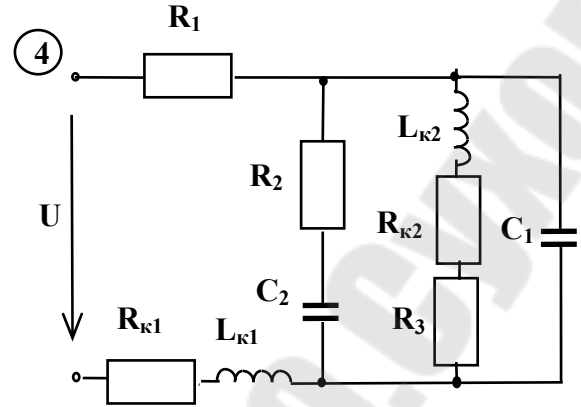
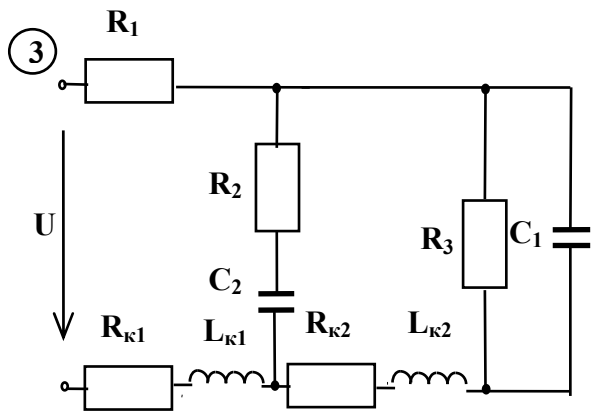
Номер варианта задания состоит из трех цифр. Первые две указывают номер схемы замещения исследуемой электрической цепи в соответствии с рис.6.3; третья цифра - номер строки в табл. 6.1, содержащей сведения об элементах цепи.

В работе используются:

- регулируемый стабилизированный источник синусоидального напряжения;
- резисторы R01-R03 ;
- конденсаторы с соответствующими номинальными значениями ;
- индуктивные катушки, параметры которых (R_K и L_K) определены в РЛР N 2.1, причем индекс «1» присвоен элементу N 11 , а индекс «2» - элементу N 12.

Измерение напряжений и токов производится измерительными приборами, расположенными на стенде.





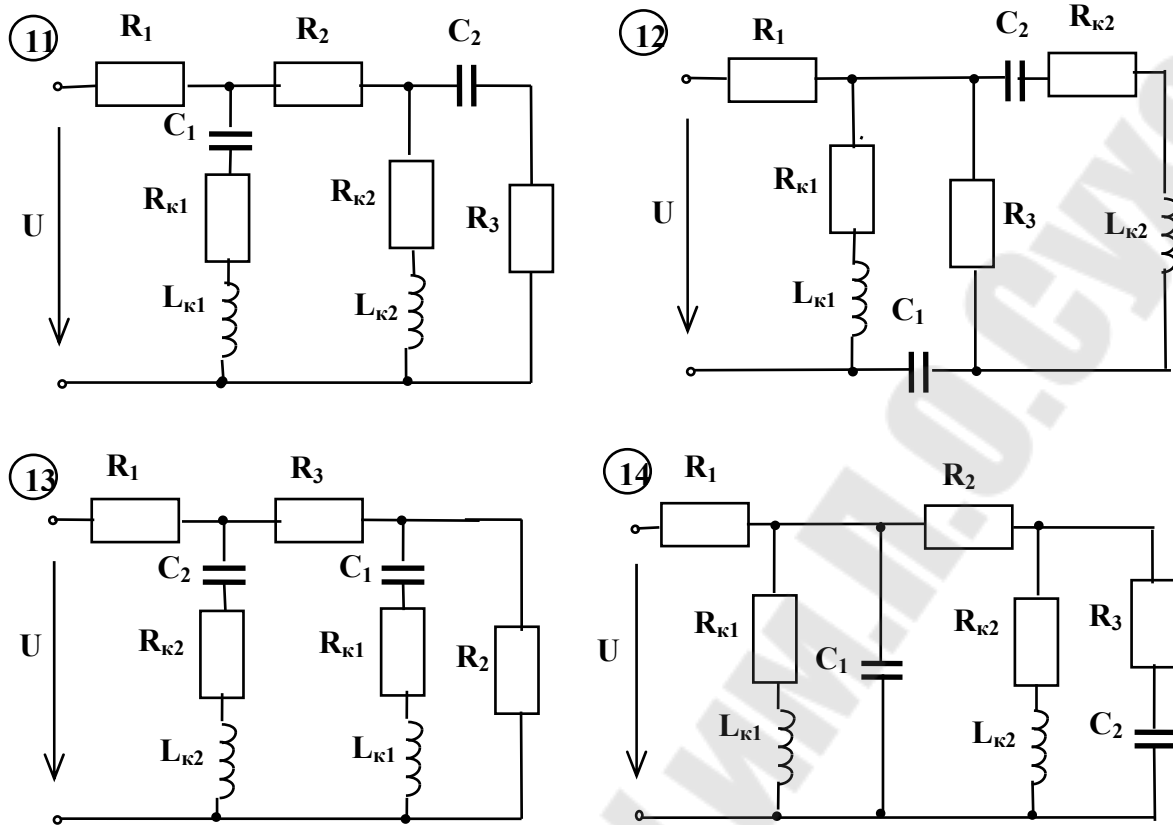


Рис.6.3. Варианты схем для исследования

- В соответствии с вариантом задания начертить исследуемую схему. Задаваясь условными положительными направлениями токов в ветвях цепи, рассчитать их значения символическим методом. При этом емкости конденсаторов считать равными номинальным значениям, указанным в таблице 6.1, а фактические значения параметров резисторов $R_{01} \div R_{03}$ и катушек индуктивности (R_{k1} , L_{k1} , R_{k2} , L_{k2}) взять из РЛР
- Результаты расчета занести в табл. 6.2.

Таблица 6.1

N п/п	U	f	R ₁	R ₂	R ₃	C ₁	C ₁
	В	кГц				мкФ	мкФ
1	15	0,8	02	01	03	0,5	1,5
2	16	1,0	03	02	01	1,0	2,0
3	17	1,5	04	03	02	1,5	0,5
4	18	2,0	02	04	03	2,0	1,0
5	19	0,8	03	01	04	0,5	1,0
6	15	1,0	04	02	01	1,0	1,5

7	16	1,5	02	03	04	1,5	2,0
8	17	2,0	04	01	02	2,0	0,5
9	18	0,8	03	04	01	0,75	2,0
10	19	1,5	02	03	01	0,5	0,75

Таблица 6.2

Токи:	I_1	I_2	I_3	I_4	I_5
	mA				
Расчетные					
Экспериментальные					

2. Правильность результатов, полученных в п.1, проверить составлением балансов активных и реактивных мощностей. При $\delta_p > 3\%$ или $\delta_Q > 3\%$

установить причину большой погрешности и при необходимости расчет повторить.

Предварительно задавая масштаб тока m_I , построить векторную лучевую диаграмму токов.

Перед построением топографической векторной диаграммы напряжений ввести буквенные обозначения соответствующих узлов и промежуточных точек (в ветвях, где два и более элементов); рассчитать падение напряжения на каждом элементе, а затем - комплексные потенциалы узлов (точек) схемы. Потенциал одного из узлов (любого) цепи задать равным нулю.

Расчетные значения потенциалов занести в табл. 6.3.

Таблица 6.3

Потенциалы:	φ_a	φ_b	φ_c	φ_d	φ_e	φ_f
	В					
Расчетные						
Экспериментальные						

Далее, выбрав масштаб m_U , построить топографическую векторную диаграмму напряжений на том же графике, где была ранее построена лучевая векторная диаграмма токов.

3. При сборке исследуемой электрической цепи на лабораторном стенде предусмотреть (используя переключки) места для включения амперметра в каждой ветви цепи. Измерения в цепи производить только после проверки расчетов и собранной схемы преподавателем.
4. Фактические величины токов в ветвях измерить амперметрами, занести в табл.6.2 и сравнить с расчетными. Результаты измерений представить для контроля преподавателю.
5. Измерения потенциалов соответствующих узлов (точек) электрической цепи произвести вольтметром, считая равным нулю потенциал того же узла, что и в п.2.
Результаты измерений занести в табл.6.3, сравнить с расчетными и представить преподавателю для контроля.

Контрольные вопросы

1. В чем сущность символического метода расчета?
2. Почему метод расчета называют символическим?
3. Постройте лучевую векторную диаграмму токов для любой разветвленной электрической цепи.
4. Покажите алгебраическую, показательную и тригонометрическую формы комплексного числа.
5. Комплексные величины $\pm j$ запишите в показательной форме.
6. Задайте на комплексной плоскости два комплексных потенциала, определите направление и величину напряжения между ними.
7. Что такое топографическая диаграмма напряжений?
8. Постройте топографическую диаграмму для произвольной схемы.
9. Почему векторную диаграмму напряжений называют топографической?
10. Какие виды мощностей вы знаете?
11. Составьте баланс мощностей для разветвленной электрической цепи с двумя источниками ЭДС и несколькими пассивными элементами.
12. Объясните физический смысл активной и реактивной мощностей.
13. Запишите выражение для определения полной мощности в комплексной форме.

Расчетно-лабораторная работа N 2.8

Методы определения взаимной индуктивности двух магнитно-связанных катушек

Цели работы:

1. Экспериментально определить взаимную индуктивность в цепи с двумя индуктивно связанными катушками тремя методами.
2. Приобрести навыки определения одноименных зажимов и построения векторных диаграмм цепей с индуктивными связями.

Программа работы

1. Определить параметры $R_{к1}$, $R_{к2}$ и L_1 , L_2 двух магнитно-связанных катушек.
2. Определить взаимную индуктивность M и коэффициент магнитной связи k катушек тремя способами.
3. Построить топографические векторные диаграммы напряжений и токов при последовательном и параллельном соединении индуктивно-связанных катушек.

Краткие сведения из теории

Два контура называются *связанными*, если изменение тока в одном из них вызывает изменение напряжения или тока в другом. Если две катушки размещены таким образом, что магнитный поток одной катушки пересекает витки другой, то между катушками имеется *взаимная* индуктивность M . Индуктивность, как известно, есть коэффициент пропорциональности между магнитным потоком и током, протекающим по этой же катушке. Аналогично, взаимная индуктивность - есть коэффициент пропорциональности между током, протекающим по одной катушке и магнитным потоком, сцепленным с витками другой. Мгновенное напряжение на зажимах второй катушки u_2 связано с мгновенным током в первой катушке i_1 соотношением

$$u_2 = M \frac{di_1}{dt} .$$

Направления магнитных потоков зависят от направления намотки катушки, поэтому на схемах указывают разметку начал и концов катушек (звездочки или точки). Если токи в обеих катушках направлены

относительно помеченных зажимов одноименно, то такое включение катушек называют *согласным*, при этом магнитные потоки самоиндукции и взаимной индукции складываются. В этом случае $M > 0$. Соединение катушек, при котором потоки направлены в противоположные стороны, называется *встречным*, тогда $M < 0$.

Последовательное соединение катушек

Как отмечалось выше, возможны два вида включения катушек - согласное (рис.7.1,а) и встречное (рис.7.1,б).

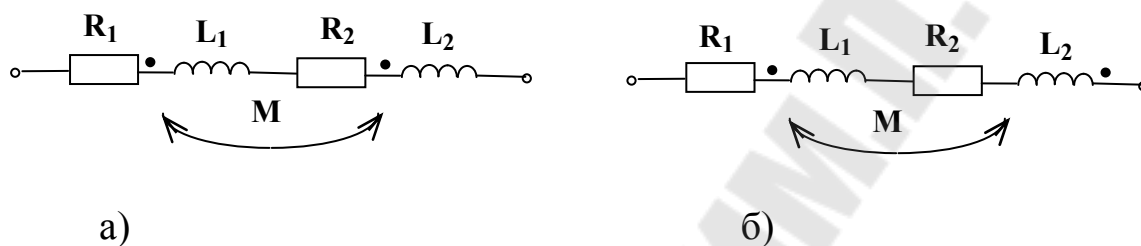


Рис.7.1

В зависимости от способа включения эквивалентное сопротивление последовательно соединенных катушек

$$\underline{Z}_{\text{согл.}} = (R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2) + j2\omega M = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 + 2\underline{Z}_M ;$$

$$\underline{Z}_{\text{встр.}} = (R_1 + R_2) + j\omega(L_1 + L_2) - j2\omega M = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 - 2\underline{Z}_M .$$

Из этих соотношений видно, что $Z_{\text{согл.}} > Z_{\text{встр.}}$,

$$\left| \underline{Z}_{\text{согл.}} - \underline{Z}_{\text{встр.}} \right| = 4\underline{Z}_M = 4X_M = 4\omega M .$$

Этим обстоятельством можно воспользоваться для определения опытным путем одноименных зажимов индуктивно связанных катушек и значения M

$$M = \frac{\left| \underline{Z}_{\text{согл.}} - \underline{Z}_{\text{встр.}} \right|}{4\omega} = \frac{L_{\text{согл.}} - L_{\text{встр.}}}{4} \quad (7.1)$$

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

Зная M , L_1 и L_2 , легко рассчитать коэффициент связи

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}. \quad (7.2)$$

Таким образом, задача экспериментального определения M и k сводится к определению индуктивности двух катушек при их согласном и встречном включениях, а также каждой из них в отдельности.

Рассмотрим способ измерения индуктивностей резонансным методом. Индуктивность измеряют по схеме рис.7.2,а, в которой последовательно с реальной катушкой включен конденсатор с известной емкостью.

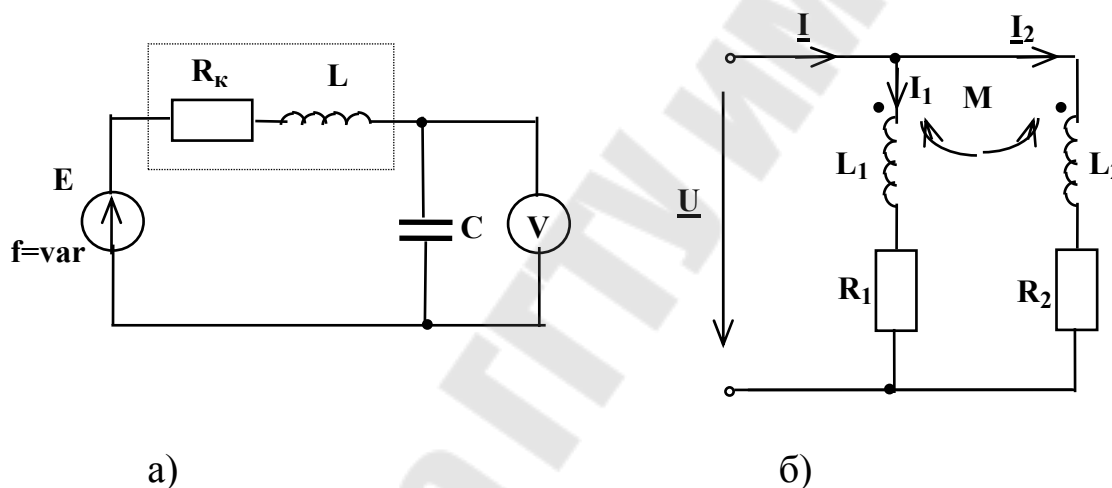


Рис.7.2

Частоту источника питания изменяют до тех пор, пока вольтметр покажет наибольшее напряжение на конденсаторе, что является признаком резонанса в цепи. Так как

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}, \quad \text{то} \quad L = \frac{1}{40f_0^2 C}.$$

Если разметка выводов катушек неизвестна, то сначала соединяют катушки произвольно, измеряют получившуюся индуктивность, затем меняют выводы у одной из катушек и повторяют измерение. Очевидно, что соединение, при котором индуктивность оказывается большей, является согласным, а при котором меньшей - встречным. Аналогичным образом измеряют каждую катушку в отдельности и рассчитывают параметры M и k .

Параллельное соединение катушек

Определим токи во всех ветвях, входное сопротивление и эквивалентную индуктивность цепи, показанной на рис.7.2,б. Поскольку в цепи три ветви, следует составить три уравнения по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} \underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 \\ \underline{U} = (R_1 + j\omega L_1)\underline{I}_1 + j\omega M \underline{I}_2 = \underline{Z}_1 \underline{I}_1 + \underline{Z}_M \underline{I}_2 & |x \underline{Z}_2 \\ \underline{U} = (R_2 + j\omega L_2)\underline{I}_2 + j\omega M \underline{I}_1 = \underline{Z}_2 \underline{I}_2 + \underline{Z}_M \underline{I}_1 & |x(-\underline{Z}_M) \end{cases}$$

Решая систему этих уравнений, получим

$$\underline{I}_1 = \frac{U(\underline{Z}_2 - \underline{Z}_M)}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}, \underline{I}_2 = \frac{U(\underline{Z}_1 - \underline{Z}_M)}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2},$$

$$\underline{I} = \underline{I}_1 + \underline{I}_2 = \frac{U(\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M)}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}.$$

Определим $\underline{Z}_{вх}$

$$\underline{Z}_{вх} = \frac{U}{\underline{I}} = \frac{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2 \mp 2\underline{Z}_M},$$

причем знак «-» в знаменателе относится к согласному включению, а знак «+» - к встречному. Если принять $R_1=R_2=0$, тогда

$$\underline{Z}_{вх} = \frac{j\omega L_1 j\omega L_2 - j\omega M j\omega M}{j\omega L_1 + j\omega L_2 \mp j2\omega M} = j\omega \left[\frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M} \right],$$

где $L_{эк.пар.} = \frac{L_1 L_2 - M^2}{L_1 + L_2 \mp 2M}$.

Воздушный трансформатор

Устройство, состоящее из двух или нескольких индуктивно связанных катушек, называется *трансформатором*. Трансформаторы могут иметь или не иметь ферромагнитный сердечник. Если сердечник отсутствует, то такой трансформатор называют воздушным (рис.7.3,а).

Обмотка трансформатора, к которой подводится питание, называется первичной; обмотка, к которой присоединяется приемник энергии - вторичной.

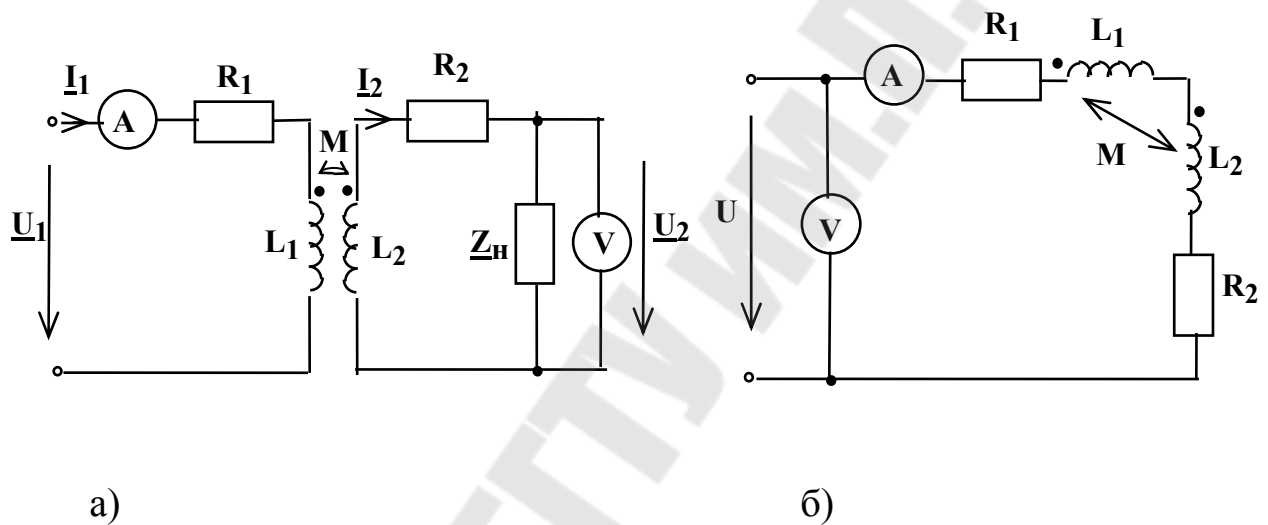


Рис.7.3

Запишем уравнения по второму закону Кирхгофа для первичной и вторичной обмоток

$$R_1 \underline{I}_1 + jX_1 \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2 = U_1;$$

$$R_2 \underline{I}_2 + jX_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 + U_2 = 0.$$

Если создать режим холостого хода во вторичной цепи, т.е. $\underline{Z}_H = \infty$, $\underline{I}_{2\text{хх}} = 0$, тогда

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{R_1 + jX_1}; \quad \underline{U}_2 = j\omega M \underline{I}_1; \quad U_2 = \omega M I_1 .$$

Таким образом, вычисляя или изменяя ток в первичной обмотке и напряжение на вторичной обмотке, можно определить взаимную индуктивность

$$M = \frac{U_2}{\omega I_1}. \quad (7.3)$$

Порядок и методика проведения исследований

В работе используются:

- регулируемый стабилизированный источник переменного напряжения (рис.2);
- блок переменной емкости (БПЕ);
- две индуктивно-связанные катушки ;
- измерительные приборы, установленные на стенде.

1. Определите параметры (R_1, L_1, R_2, L_2) каждой из двух индуктивно связанных катушек на произвольной частоте (300.....2000 Гц) по методике, изложенной в РЛР N 2.1 (п.1). Результаты измерений и расчетов занесите в табл. 7.1 и представьте преподавателю.

Таблица 7.1

Результаты :	эксперимента			расчета					
Катушка	Цепь постоянного тока			Цепь синусоидального тока					
	U	I	R_k	U	I	f	Z	X	L
	В	А	Ом	В	А	Гц	Ом	Ом	Гн
I									
II									

2. Соберите электрическую цепь по рис.7.3,б (1-й метод). Величины M и K вычислите по формулам (7.1) и (7.2). Результаты измерений и вычислений занесите в табл.7.2 и представьте преподавателю.

Таблица 7.2

Включе- ние	U	I	f	Z	X	M	k
катушек:	В	А	Гц	Ом	Ом	Гн	-
согласное							
встречное							

3. Соберите электрическую цепь по рис.7.3,а (2-й метод). Величину M вычислите по формуле (7.3). Результаты измерений и вычислений занесите в табл.7.3.

Таблица 7.3

U_2	I_1	f	M	k
В	А	Гц	Гн	-

4. Соберите электрическую цепь по рис.7.4 (3-й метод).

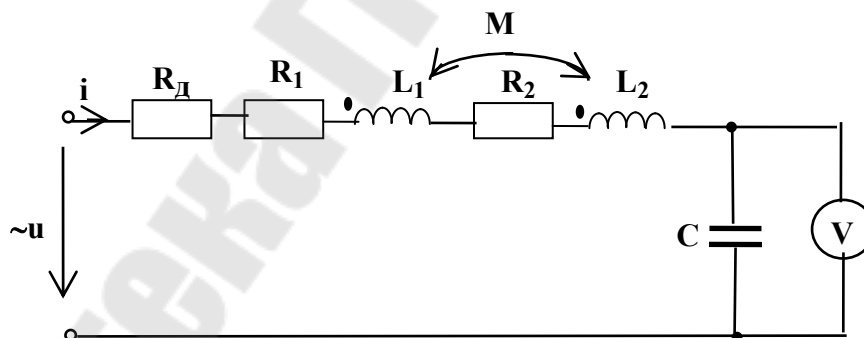


Рис.7.4

В качестве R_d используйте БПС ($R_d = 100...200$ Ом), а в качестве C - БПЕ, величину емкости C выбрать такой, чтобы резонансная частота была в пределах 1...3 кГц. Меняя частоту генератора, добей-

тес резонанса напряжений по максимальному показанию вольтметра. Результаты измерений и вычислений занесите в табл.7.4.

Таблица 7.4

Включение катушек:	U	I	f_0	Z	X	M	k
	В	А	Гц	Ом	Ом	Гн	-
согласное							
встречное							

Сравните величины M, определенные тремя методами и сделайте выводы.

5. Рассчитайте токи в ветвях, входное сопротивление и эквивалентную индуктивность цепи с параллельным соединением индуктивно-связанных катушек. Соберите электрическую цепь по схеме рис.7.2,б. Задайте входное напряжение U такое, чтобы токи в катушках не превышали величину 100 мА. Результаты расчета и измерений занесите в табл.7.5.

Таблица 7.5

Исходные постоянные величины:	Результаты:	I ₁	I ₂	I	Z	L _{экв.}
		А	А	А	Ом	Гн
U = В ; f = Гц	Расчета					
R ₁ = ... Ом ; L ₁ = ... Гн ; R ₂ = ... Ом ; L ₂ = Гн	Эксперимента					

Контрольные вопросы

1. Что понимают под взаимной индуктивностью двух катушек?
2. Какое соединение катушек называют согласным и какое - встречным?
3. Как можно экспериментально определить взаимную индуктивность M?
4. Объясните метод определения M при последовательном соединении катушек.

5. Расскажите о резонансном методе определения M .
6. Объясните способ определения M по трансформаторной схеме включения.
7. Как определить коэффициент связи k ?
8. Каковы особенности расчета входного сопротивления цепи при наличии взаимных индуктивностей?
9. Покажите, как определить эквивалентную индуктивность двух параллельно соединенных катушек со взаимной индуктивностью.
10. Составьте уравнения по законам Кирхгофа для воздушного трансформатора.
11. Какой трансформатор называют воздушным?
12. Запишите формулу для определения M при последовательном соединении катушек.
13. Запишите формулу для определения M при включении катушек по схеме воздушного трансформатора.
14. Получите формулу определения индуктивности с использованием резонанса напряжений.

Расчетно-лабораторная работа N 2.9

Исследование линейной электрической цепи с магнитно-связанными катушками

Цели работы:

1. Изучить методы анализа цепей с индуктивно-связанными катушками.
2. Научиться экспериментально определять вносимые сопротивления.

Программа работы

1. Рассчитать разветвленную электрическую цепь с магнитно-связанными катушками в соответствии с вариантом задания.
2. Собрать исследуемую электрическую цепь на наборном поле. Измерить токи во всех ветвях и сравнить их с расчетными.
3. Рассчитать и экспериментально определить вносимые сопротивления.

Краткие сведения из теории

Для расчета цепей с индуктивно связанными катушками часто используют метод, который называют *развязыванием* магнитно-связанных катушек. Метод состоит в том, что исходную схему с магнитно-связанными индуктивностями путем введения дополнительных индуктивностей и изменения имевшихся преобразуют так, что магнитная связь между всеми индуктивностями в преобразованной схеме отсутствует.

В качестве примера рассмотрим схему рис.8.1,а. Составим уравнения по законам Кирхгофа в комплексной форме записи

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3; \quad (8.1)$$

$$\underline{I}_1(R_1 + j\omega L_1) + \underline{I}_2 \left(R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} \right) + \underline{I}_3 j\omega M = \underline{E}_1; \quad (8.2)$$

$$\underline{I}_1 j\omega M - \underline{I}_2 \left(R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} \right) + \underline{I}_3 (R_3 + j\omega L_3) = -\underline{E}_3 \quad (8.3)$$

Обход контуров схемы показан стрелками. Составим схему, эквивалентную схеме рис.8.1,а . С этой целью в уравнении (8.2) заменим \underline{I}_3 на $\underline{I}_1 - \underline{I}_2$ и в уравнении (8.3) - \underline{I}_1 на $\underline{I}_2 + \underline{I}_3$, причем замену одних токов другими производим так, чтобы в каждое из получающихся после замены уравнений входили только те токи, которые текут в ветвях рассматриваемого контура.

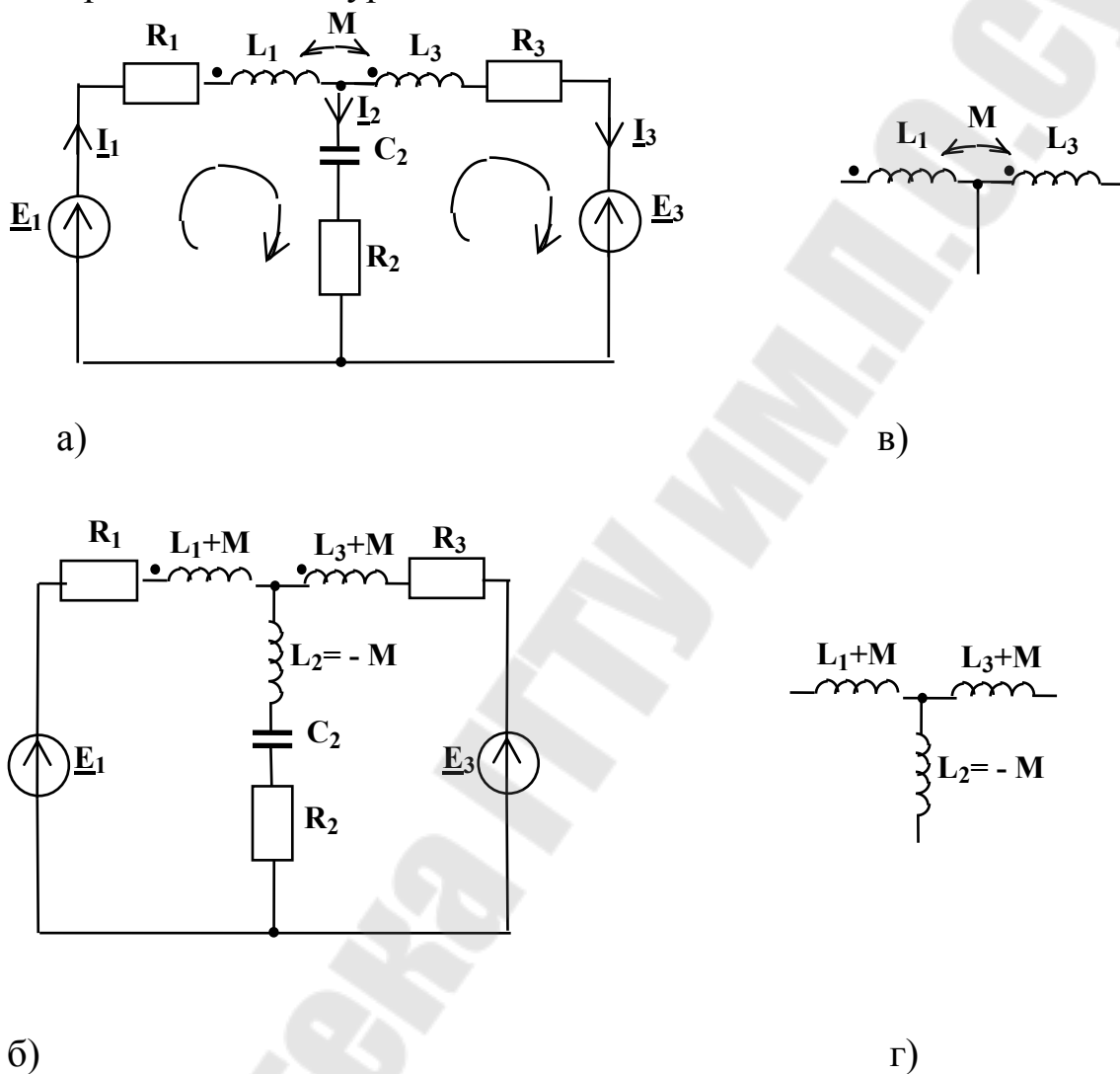


Рис.8.1

В результате получим

$$\underline{I}_1 [R_1 + j\omega(L_1 + M)] + \underline{I}_2 \left(R_2 - j\frac{1}{\omega C_2} - j\omega M \right) = \underline{E}_1; \quad (8.4)$$

$$-I_2 \left(R_2 - j \frac{1}{\omega C_2} - j\omega M \right) + I_3 [R_3 + j\omega(L_3 + M)] = -E_3 \quad (8.5)$$

Этим уравнениям соответствует схема рис.8.1,б.

Таким образом, участок цепи, изображенный на рис.8.1,в, в расчетном смысле может быть заменен участком, показанным на рис.8.1,г. Если же катушки будут включены одноименными зажимами к узлу, то знаки перед M необходимо изменить на противоположные.

Воздушный трансформатор также можно заменить эквивалентной схемой, в которой контуры имеют не индуктивную, а электрическую связь. Вместо двух обмоток трансформатора показывают три индуктивности, собранные по Т-образной схеме, а все остальные элементы оставляют без изменения.

Покажем, что уравнения, составленные по законам Кирхгофа, одинаковы для обеих схем

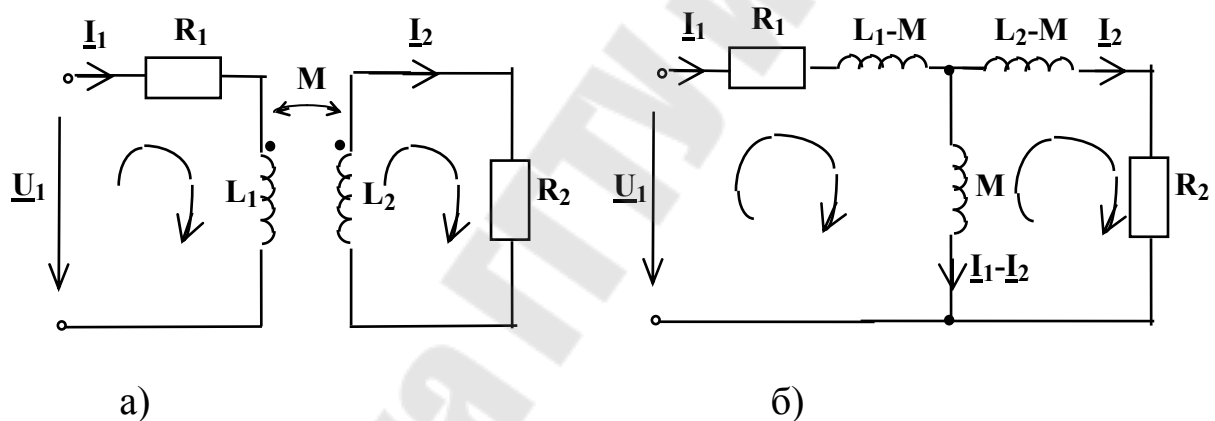


Рис.8.2

для схемы рис.8.2,а

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 - j\omega M \underline{I}_2; \quad (8.6)$$

$$0 = R_2 \underline{I}_2 + j\omega L_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 \quad (8.7)$$

для схемы рис.8.2,б

$$\underline{U}_1 = R_1 \underline{I}_1 + j\omega L_1 \underline{I}_1 - \cancel{j\omega M \underline{I}_1} + \cancel{j\omega M \underline{I}_1} - j\omega M \underline{I}_2;$$

$$0 = R_2 \underline{I}_2 - j\omega M \underline{I}_1 + \cancel{j\omega M \underline{I}_2} + j\omega L_2 \underline{I}_2 - \cancel{j\omega M \underline{I}_2}$$

Одним из методов расчета токов в индуктивно-связанных системах является *метод замены* двухконтурной системы эквивалентной одноконтурной. Сущность этого метода состоит в том, что исходную двухконтурную схему заменяют эквивалентной одноконтурной, в которой все элементы первичного контура остаются без изменения, а вместо элементов вторичного контура включают в первичный контур два сопротивления - одно резистивное $R_{вн}$ и одно реактивное $X_{вн}$, называемые *вносимыми*. Определим эти сопротивления, для чего перепишем уравнения (8.6), (8.7) в другом виде и определим из них ток I_1

$$\begin{aligned} \underline{U}_1 &= \underline{Z}_1 I_1 - \underline{Z}_M I_2 \quad | \times \underline{Z}_2; \\ 0 &= -\underline{Z}_M I_1 + \underline{Z}_2 I_2 \quad | \times \underline{Z}_M. \end{aligned}$$

Умножим первое уравнение на \underline{Z}_2 , а второе - на \underline{Z}_M и сложим полученные выражения

$$\underline{U}_1 \underline{Z}_2 = (\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2) I_1,$$

откуда

$$I_1 = \frac{\underline{U}_1 \underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 \underline{Z}_2 - \underline{Z}_M^2} \quad \text{или} \quad I_1 = \frac{\underline{U}_1}{\underline{Z}_1 - \frac{\underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_2}}. \quad (8.8)$$

Обозначим через $\underline{Z}_{вн} = -\frac{\underline{Z}_M^2}{\underline{Z}_2} = -\frac{(j\omega M)^2}{R_2 + jX_2} =$

$$= -\frac{(-\omega^2 M^2)(R_2 - jX_2)}{(R_2 + jX_2)(R_2 - jX_2)} = \frac{\omega^2 M^2}{(R_2^2 + X_2^2)} R_2 - j \frac{\omega^2 M^2}{R_2^2 + X_2^2} X_2,$$

откуда

$$R_{вн} = \frac{(\omega M)^2}{Z_2^2} R_2; \quad X_{вн} = -\frac{(\omega M)^2}{Z_2^2} X_2 \quad (8.9)$$

Эквивалентная схема системы представлена на рис.8.3.

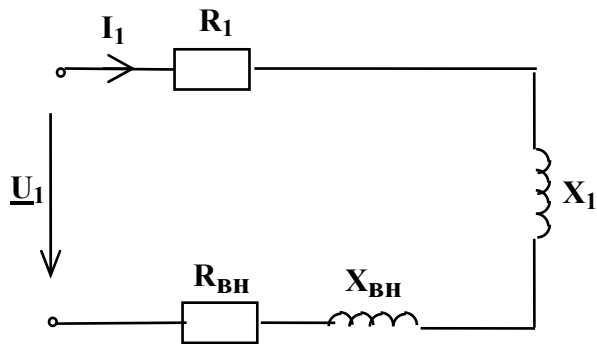


Рис.8.3

Ток \underline{I}_1 в эквивалентной схеме определится так

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}_1}{(R_1 + R_{\text{вн}}) + j(X_1 + X_{\text{вн}})}, \quad (8.10)$$

а ток \underline{I}_2 из выражения (8.7)

$$\underline{I}_2 = \underline{I}_1 \frac{j\omega M}{R_2 + j\omega L_2} \quad (8.11)$$

Определим физический смысл вносимых сопротивлений. Резистивное $R_{\text{вн}}$ есть такое сопротивление, в котором при токе \underline{I}_1 рассеивается такая же мощность, которая рассеивается в резистивных сопротивлениях, включенных во вторичный контур, при токе \underline{I}_2 . Следовательно, справедливым является равенство

$$R_{\text{вн}} I_1^2 = R_2 I_2^2,$$

откуда

$$R_{\text{вн}} = R_2 \left(\frac{I_2}{I_1} \right)^2.$$

Реактивное $X_{\text{вн}}$ представляет тот элемент, который учитывает размагничивающее действие вторичного контура на первичный. Именно поэтому вносимое $X_{\text{вн}}$ имеет знак минус.

При расчете баланса мощностей в цепях с взаимной индуктивностью кроме расчета активной и реактивной мощности, потребляемой резисторами, катушками и конденсаторами, необходимо учитывать и реактивную мощность в сопротивлении связи

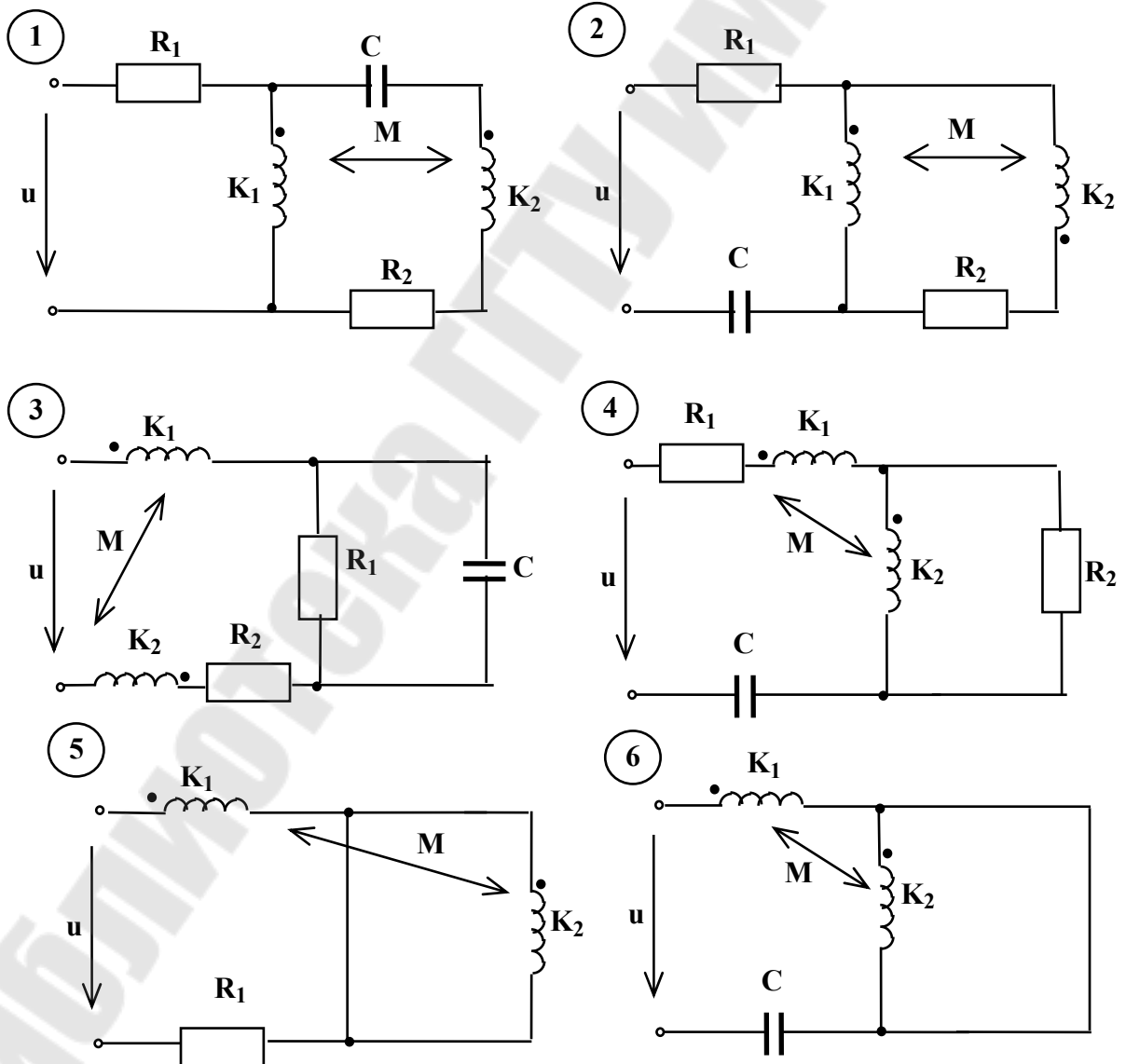
$$Q_M = \pm 2X_M I_1 I_2 \cos\left(\hat{I}_1, \hat{I}_2\right),$$

где I_1 и I_2 - модули токов первой и второй магнитно-связанных катушек,

X_M - модуль сопротивления взаимоиндукции,

$\cos\left(\hat{I}_1, \hat{I}_2\right)$ - косинус угла между векторами токов \underline{I}_1 и \underline{I}_2 .

Знак «+» ставится при согласном включении катушек, а «-» - при встречном.



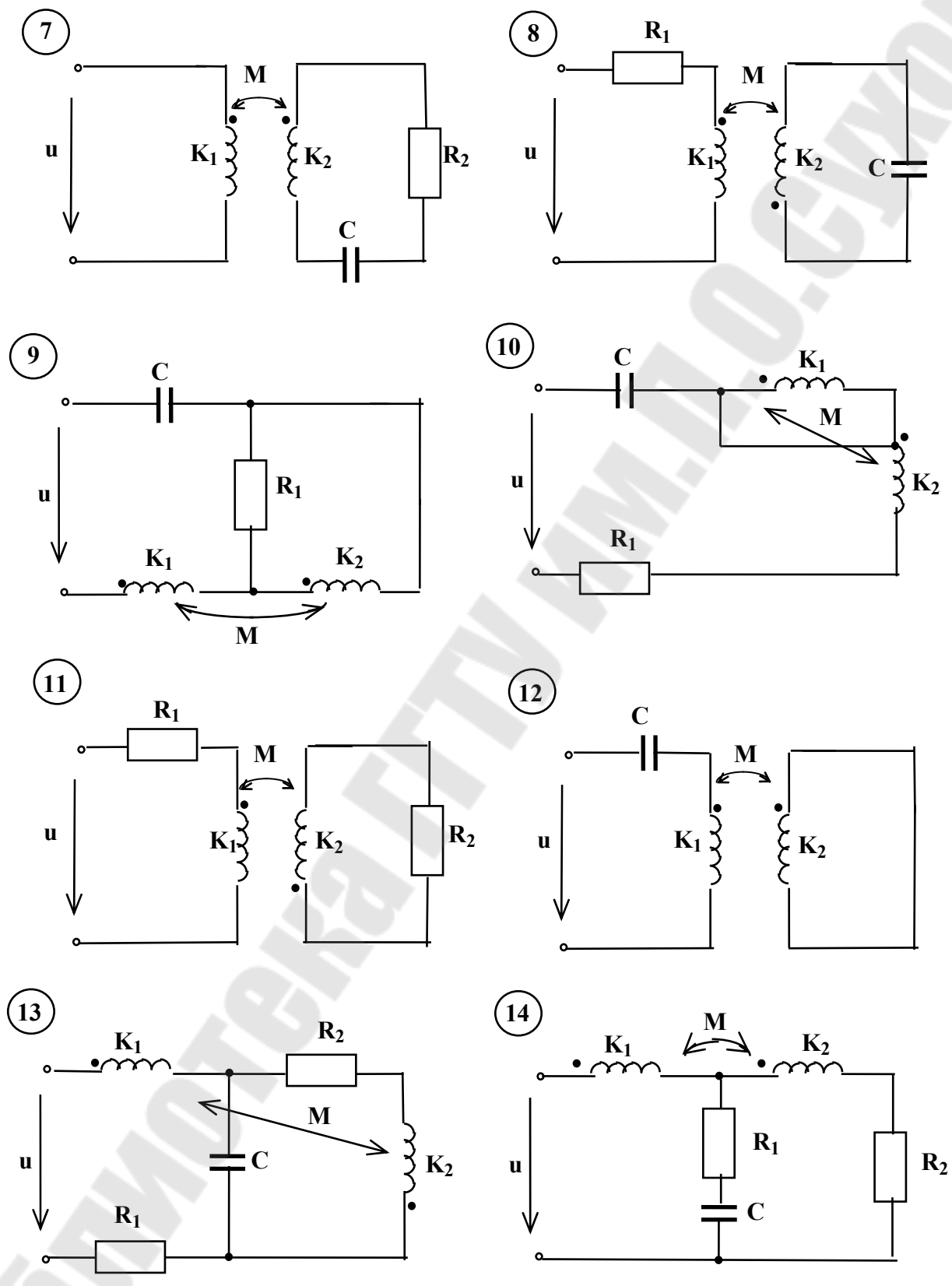


Рис.8.4

Примечание: катушки K_1 и K_2 имеют параметры R_1, L_1 и R_2, L_2 , определенные в РЛР N 2.7.

Порядок и методика проведения исследований

1. Рассчитать разветвленную электрическую цепь с магнитно-связанными катушками (рис.8.4) в соответствии с вариантом задания и данными из табл. 8.1.

Таблица 8.1

Вариант:		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
f	кГц	0,8	0,9	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	0,7	1,25	0,6	0,5	1,4	1,0
R_1	элемент	01	01	01	01	01	-	-	01	01	01	01	-	01	01
R_1	элемент	02	02	02	02	-	-	01	-	-	-	02	-	02	02
C	мкФ	5	6	8	14	-	10	9	12	15	20	-	18	10	12

Проверить расчет, составив энергетический баланс.

2. Собрать рассчитанную в п.1 электрическую цепь на наборном поле станда, измерить токи в ветвях, занести в табл. 8.2 и представить для контроля преподавателю.

Таблица 8.2

Токи:	Ед.измерения	Расчет	Эксперимент	Относит.погрешн.,%
I_1	А			
I_2	А			
I_3	А			

3. Рассчитать вносимые сопротивления для схемы рис.8.2,а по формулам (8.9). Собрать электрическую цепь (рис.8.3) с учетом $R_{вн}$ и $X_{вн}$ и измерить ток I_1 . Сравнить его с током I_1 , измерив его в схеме рис.8.2. Сопоставить результаты измерения и сделать вывод.

Контрольные вопросы

1. Какие методы расчета электрических цепей с магнитно-связанными катушками вы знаете ?
2. В чем суть метода «развязывания» магнитно-связанных катушек ?
3. Объясните правило «развязывания».
4. Составьте T-образную схему замещения для воздушного трансформатора.
5. В чем состоит сущность метода замены двухконтурной системы эквивалентной одноконтурной ?
6. Дайте определение $R_{вн}$.
7. Дайте определение $X_{вн}$.
8. Объясните физический смысл $R_{вн}$.
9. Объясните физический смысл $X_{вн}$.
10. Составьте уравнения по законам Кирхгофа для воздушного трансформатора.
11. Как можно определить экспериментально $R_{вн}$?
12. Как можно определить экспериментально $X_{вн}$?
13. Покажите расчет баланса мощностей в цепях со взаимной индуктивностью.

Расчетно-лабораторная работа N 2.10

Исследование передаточных частотных характеристик.

Цель работы: расчет и экспериментальное снятие амплитудно-частотных (АЧХ) и фазочастотных (ФЧХ) характеристик.

Программа работы

1. Рассчитать АЧХ и ФЧХ электрических цепей согласно варианта задания.
2. Снять экспериментально АЧХ и ФЧХ.
3. Построить и сравнить расчетные и экспериментальные АЧХ и ФЧХ.

Краткие сведения из теории

Комплексной передаточной функцией по напряжению \underline{H}_U называется отношение комплексного выходного напряжения \underline{U}_2 к комплексному входному напряжению \underline{U}_1 при изменении частоты.

Отношение $\underline{U}_2:\underline{U}_1$ на некоторой определенной частоте называют *комплексным коэффициентом передачи* \underline{K} . Передаточная функция выявляет закономерности изменений амплитуды и фазы в зависимости от частоты. Передаточная функция состоит из двух характеристик: *амплитудно-частотной* и *фазочастотной*.

Чтобы рассчитать АЧХ и ФЧХ четырехполюсника, в общем случае необходимо:

1. Задаться произвольным напряжением на входе \underline{U}_1 .
2. Любым методом рассчитать напряжение на выходе \underline{U}_2 .
3. Взять отношение $\underline{U}_2:\underline{U}_1$, входное напряжение при этом сокращается, получившееся выражение будет комплексной передаточной функцией $\underline{H}_U = H_U e^{j\varphi_H}$ или $H(j\omega) = H(\omega) e^{j\varphi_H(\omega)}$.
4. Записать выражение $H = f(\omega)$, подставить различные частоты и построить передаточную АЧХ цепи. Модуль передаточной функции есть отношение модулей выходного и входного напряжений $H = U_2 : U_1$ при различных частотах. В ряде случаев АЧХ записывают в виде

$$H(\omega) = \frac{U_2(\omega)}{U_1(\omega)}$$

5. Записать выражение ФЧХ, т.е. $\varphi_H(\omega) = \varphi_{U_2}(\omega) - \varphi_{U_1}(\omega)$.

Чтобы рассчитать передаточную АЧХ необходимо записать модуль полу- чившегося комплексного выражения:

$$\underline{H}_U = \frac{A + jB}{D + jF} = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{D^2 + F^2}} e^{j \arctg \frac{B}{A} - \arctg \frac{F}{D}} = H e^{j\varphi_H} \quad (10.1)$$

ФЧХ, построенная по (10.1), представляет разность двух кривых - ФЧХ числителя и ФЧХ знаменателя.

Если ФЧХ необходимо иметь в виде одного выражения $\varphi_H = f(\omega)$, нужно избавиться от мнимости в знаменателе, для чего следует числитель и знаменатель умножить на комплекс, сопряженный с комплексом знаменателя

$$\underline{H}_U = \frac{(A + jB)(D - jF)}{(D + jF)(D - jF)} = \sqrt{\frac{A^2 + B^2}{D^2 + F^2}} e^{j \arctg \left(\frac{BD - AF}{AD + BF} \right)},$$

откуда

$$\varphi_H = \arctg \frac{BD - AF}{AD + BF}.$$

Иногда требуется качественно (только по характерным точкам, без выполнения подробных расчетов) построить ФЧХ. Для этого необходимо сделать следующее:

1. Построить характеристику $\varphi_{Z_{ex}} = f(\omega)$.
2. Построить характеристику $\varphi_{I_{ex}} = f(\omega)$. При этом следует иметь в виду, что кривая $\varphi_{I_{ex}} = f(\omega)$ представляет зеркальное отображение кривой $\varphi_{Z_{ex}} = f(\omega)$, поскольку

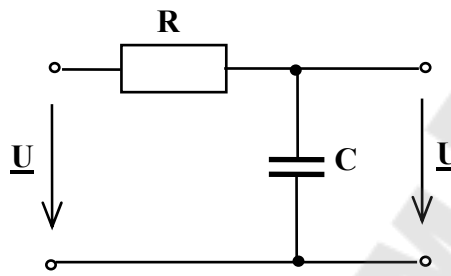
$$\underline{I}_{ex} = I_{ex} e^{j\varphi_{ex}} = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{ex}} = \frac{U e^{j0^\circ}}{Z e^{j\varphi_{Z_{ex}}}} = I e^{-j\varphi_{Z_{ex}}},$$

откуда

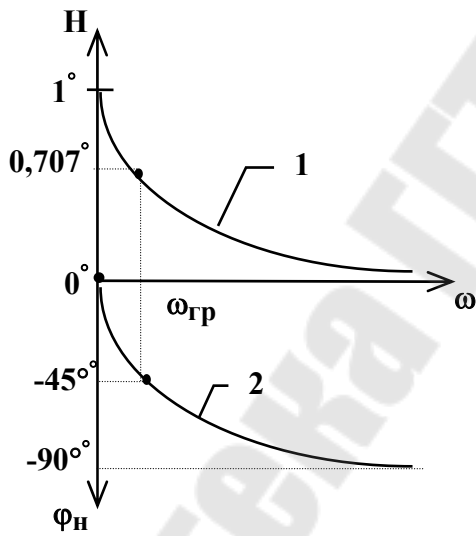
$$\varphi_{I_{ex}} = -\varphi_{Z_{ex}}$$

3. Построить характеристику $\Delta\varphi = \varphi_{U_{вых}} - \varphi_{I_{ex}}$.
4. Построить ФЧХ четырехполюсника, т.е.

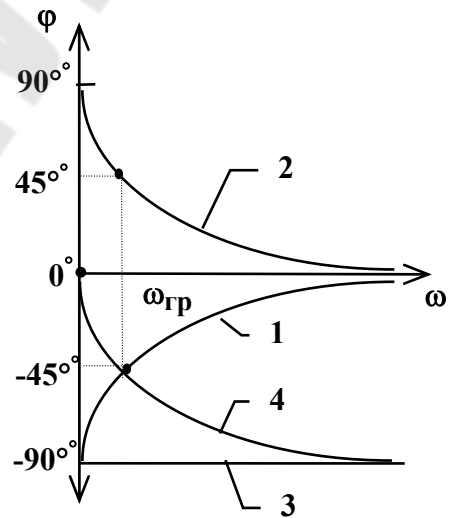
$$\varphi_{U_2} = \varphi_{I_{ex}} + \Delta\varphi = \varphi_H$$



а)



б)



в)

Рис.10.1

Рассчитаем АЧХ и ФЧХ электрической цепи рис.10.1,а.

$$\underline{H}_U = \frac{\underline{Z}_2}{\underline{Z}_1 + \underline{Z}_2} = \frac{\frac{1}{j\omega C}}{R + \frac{1}{j\omega C}} = \frac{1}{1 + j\omega RC} = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} e^{-j \arctg \omega RC}$$

$$H = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}, \quad \varphi_n = -\arctg \omega RC$$

Построим АЧХ. При $\omega=0$ $H=1$; $\omega=\omega_{гр}$ $H = \frac{1}{\sqrt{2}} = 0,707$; $\omega=\infty$ $H=0$
(рис.10.1,б, кривая 1).

Построим ФЧХ. При $\omega=0$ $\varphi_n=0$; $\omega=\omega_{гр}$ $\varphi_n=-45^\circ$; $\omega=\infty$ $\varphi_n=90^\circ$
(рис.10.1,б, кривая 2).

Построим качественно ФЧХ для этой же цепи (рис.10.1,в).

1. Построим кривую $\varphi_{Z_{ex}} = f(\omega)$ (кривая 1)

$$\underline{Z}_{ex} = R - j \frac{1}{\omega C} = R \left(1 - j \frac{1}{\omega RC} \right) = R \left(1 - j \frac{\omega_{гр}}{\omega} \right)$$

2. Построим кривую $\varphi_{I_{ex}} = f(\omega)$ (кривая 2), как зеркальное отображение характеристики $\varphi_{Z_{ex}} = f(\omega)$.

3. Построим кривую $\Delta\varphi = f(\omega)$ (кривая 3). Так как выходное напряжение в цепи снимается с емкостного элемента, то это напряжение при любой частоте отстает от входного тока на 90° .

4. ФЧХ $\varphi_{U_2} = f(\omega) = \varphi_{I_{ex}} + \Delta\varphi$, а так как $\psi_{U_1} = 0$, то ФЧХ данной цепи равна ФЧХ выходного напряжения $\varphi_n = \varphi_{U_2}$ (кривая 4).

Порядок и методика проведения исследований

В работе используются:

- регулируемый стабилизированный источник переменного напряжения ($U=var, f=var$, рис.2);

- блок переменного сопротивления (БПС);
- блок переменной индуктивности (БПИ);
- блок переменной емкости (БПЕ);
- резисторы и конденсаторы из набора элементов;
- измерительные приборы и осциллограф, установленные на стенде.

1. Рассчитайте АЧХ и ФЧХ электрической цепи (рис.10.2) согласно выданного преподавателем варианта. Электрические величины и параметры схемы задаются в следующих диапазонах:

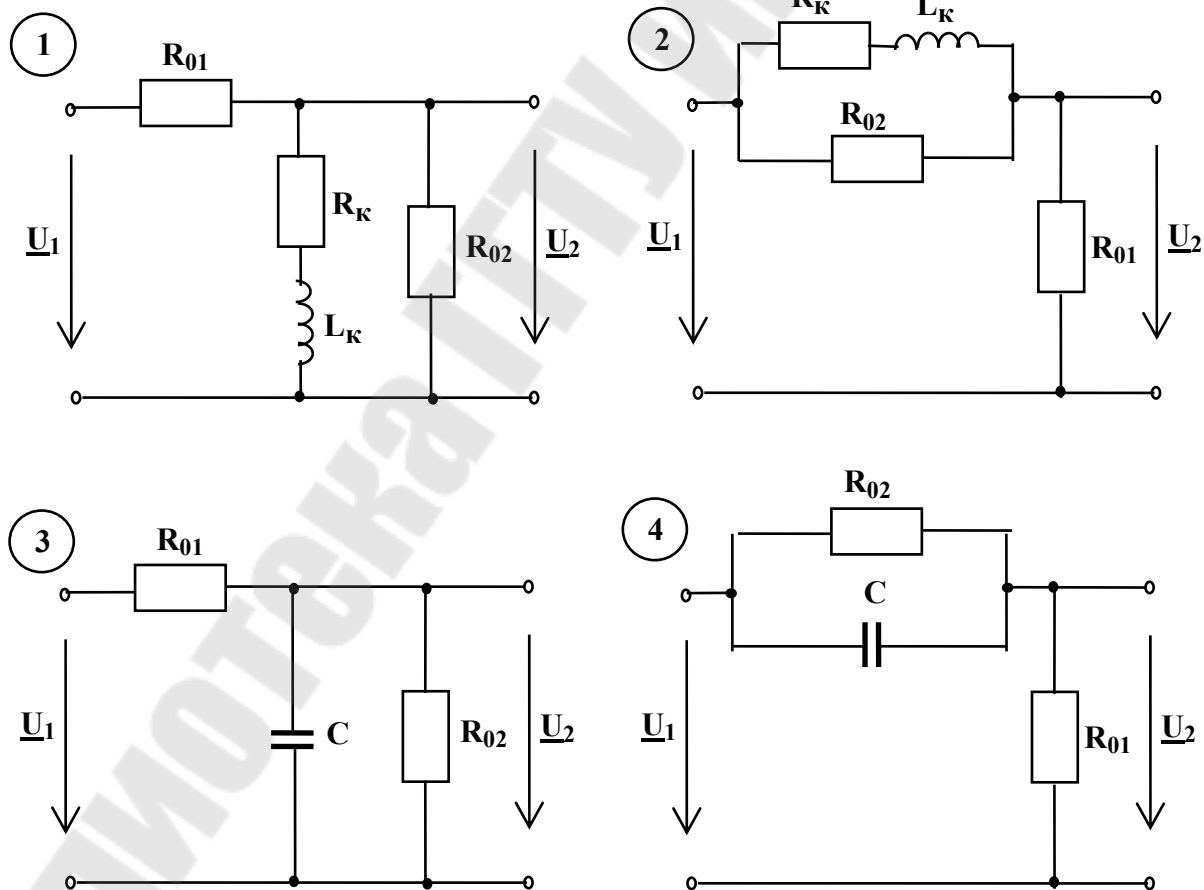
частота f - 300.....2000 Гц ,

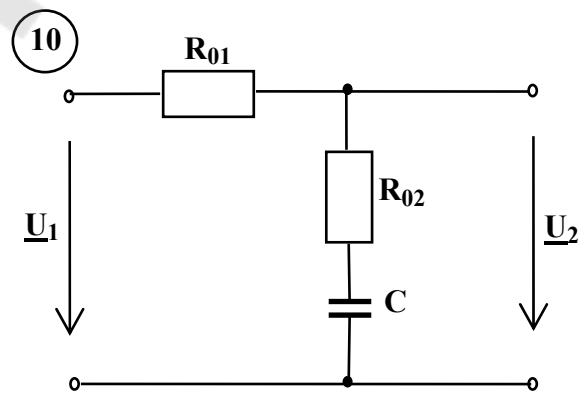
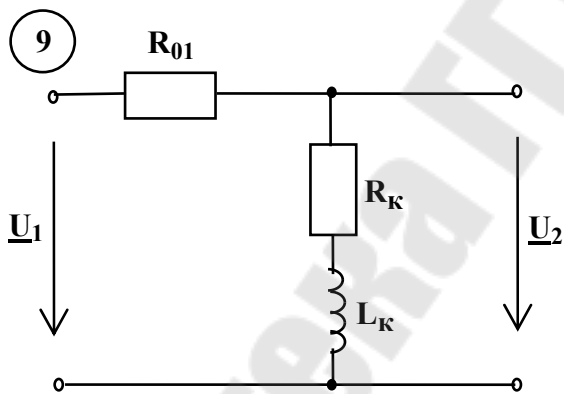
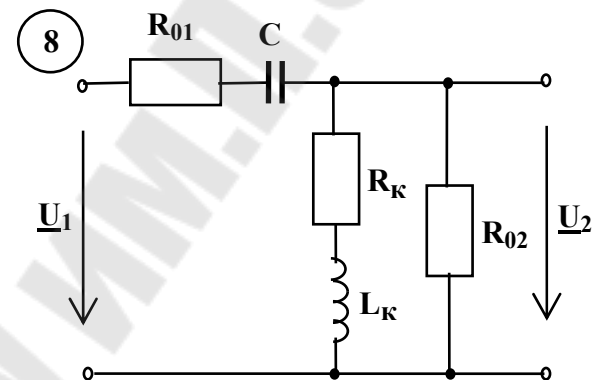
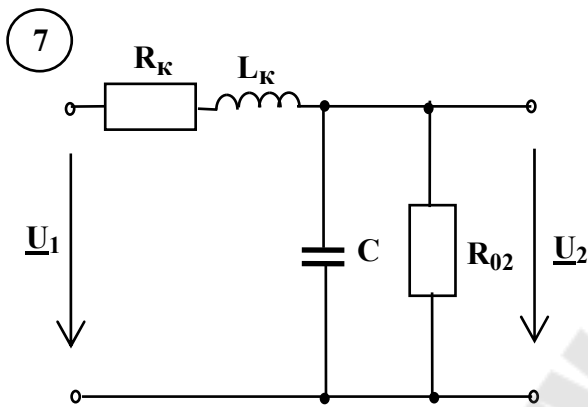
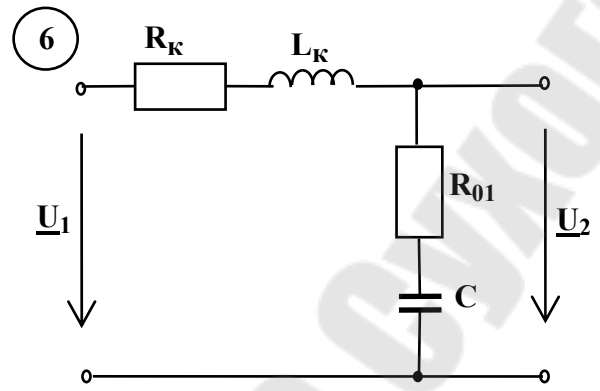
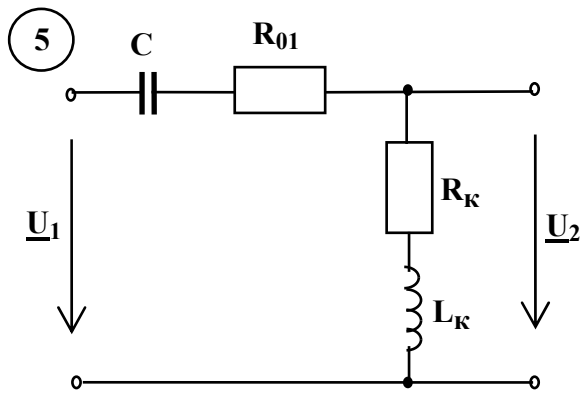
напряжение U_1 - 5.....20 В ,

индуктивность L_K - 5.....100 мГн,

емкость C - 0,25.....10 мкФ .

В качестве резисторов R_{01} , R_{02} используются элементы 01 и 02, а R_K измеряют по методике, изложенной в РЛР 2.1.





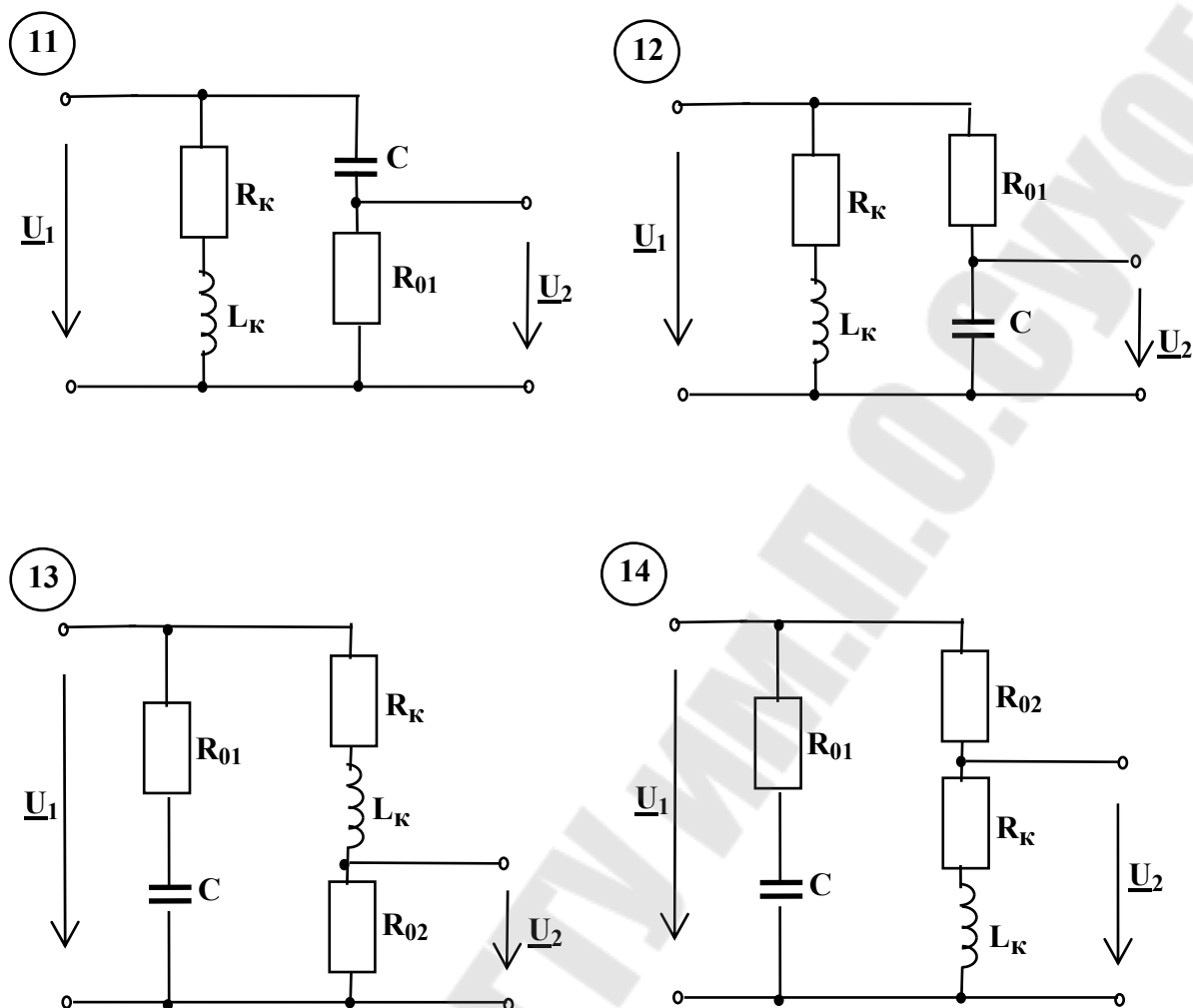


Рис.10.2

Примечание. При расчете схемы ток, протекающий через катушку, не должен превышать 0,1 А, а токи, через резисторы R_{01} и R_{01} не более $I_{\text{доп}}$ через данные резисторы (Табл.1.1, РЛР N 1.1)

2. Соберите на наборном поле рассчитанную в п.1 электрическую цепь и, изменяя частоту, снимите экспериментально АЧХ и ФЧХ по методике, изложенной в РЛР N 2.9. Расчетные и экспериментальные данные занесите в табл.10.1

Таблица 10.1

Исходные постоянные величины:	N п/п	f var Гц	Вычислено		Измерено	
			Н	Φ_H	Н	Φ_H
			-	град	-	град
$U_1 = \dots \text{В}, \quad f = \dots \text{Гц},$	1					

$R_{01} = \dots \text{Ом},$	2					
$R_{02} = \dots \text{Ом},$.					
$R_k = \dots \text{Ом}, L_k = \dots$	6					
$\Gamma_H,$	7					
$C = \dots \text{мкФ}$						

2. По данным табл. 10.1 постройте расчетные и экспериментальные АЧХ и ФЧХ и оцените погрешности.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение комплексной передаточной функции.
2. Что такое комплексный коэффициент передачи?
3. Дайте определение АЧХ.
4. Дайте определение ФЧХ.
5. Расскажите методику расчета АЧХ четырехполюсника.
6. Расскажите методику расчета ФЧХ четырехполюсника.
7. Объясните методику расчета (качественно) ФЧХ.
8. Как экспериментально снять АЧХ?
9. Как экспериментально снять ФЧХ?
10. Как построить зависимость $\underline{H}_U(\omega)$?

Литература

1. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи. Учебник для электротехнич., энерг., приборостроит. спец. ВУЗов, 9-е изд. - М.: Высш.школа, 1996. 81...130с.
2. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. Учебник для ВУЗов, 5-е изд.- М.: Энергоатомиздат, 1989. 61...131с.
3. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники. Учебник для ВУЗов , том 1 , 3-е изд. - Л.: Энергоиздат, 1981.163...281с.
4. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. Учебник для ВУЗов, 4-е изд.- М.: Энергия, 1979. 60...130с.
5. Каплянский А.Е., Лысенко А.П., Полотовский Л.С. Теоретические основы электротехники. - М.: Высш.школа, 1972. 100...140, 163...179с.
6. Грачев С.А., Соленков В.В. Практическое пособие к лабораторным работам по разделу «Цепи постоянного тока» (часть1) курса «Теоретические основы электротехники» для студентов электротехнических специальностей. - ГГТУ, Гомель, 1999г.

Содержание

Введение	
Л.р. N 2.1. Измерение параметров синусоидального напряжения с помощью осциллографа.....	
Л.р. N 2.2. Электрическая цепь переменного тока и ее элементы.....	
Л.р. N 2.3. Исследование цепи переменного тока с резистором и конденсатором.....	
Л.р. N 2.4. Исследование цепи переменного тока с резистором и реальной катушкой.....	
Л.р. N 2.5. Исследование цепи переменного тока с последовательно соединенными реальной катушкой и конденсатором (резонанс напряжений).....	
Л.р. N 2.6. Исследование цепи переменного тока с параллельно соединенными элементами (резонанс токов).....	
Л.р. N 2.7. Расчет и экспериментальная проверка линейной электрической цепи переменного тока.....	
Л.р. N 2.8. Методы определения взаимной индуктивности двух магнитно-связанных катушек	
Л.р. N 2.9. Исследование линейной электрической цепи с магнитно-связанными катушками.....	
Л.р. N 2.10. Исследование передаточных частотных характеристик.....	
Литература	

**Соленков Виталий Владимирович
Брель Виктор Валерьевич**

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

**ЛАБОРАТОРНЫЙ ПРАКТИКУМ
по курсу «Теоретические основы электротехники»
для студентов специальностей
1-43 01 02 «Электроэнергетические системы и сети»,
1-43 01 03 «Электроснабжение (по отраслям)»,
1-43 01 07 «Техническая эксплуатация
энергооборудования организаций»
и 1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
дневной и заочной форм обучения**

Подписано к размещению в электронную библиотеку
ГГТУ им. П. О. Сухого в качестве электронного
учебно-методического документа 24.05.12.

Рег. № 14Е.

E-mail: ic@gstu.by

<http://www.gstu.by>