

Министерство образования и науки Российской Федерации
Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра промышленной электроники
и информационно-измерительной техники

С.С. Фролов

АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ РЕАКТИВНЫХ ЦЕПЕЙ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

Методические указания
к лабораторной работе

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом Государственного
образовательного учреждения высшего профессионального образования
«Оренбургский государственный университет»

Оренбург
ИПК ГОУ ОГУ
2010

УДК 621.382.002.56(07)
ББК 32.852я7
Ф18

Рецензент – доцент, кандидат технических наук С.Н. Бравичев

- Фролов, С.С.**
Ф18 Анализ линейных реактивных цепей синусоидального тока : методические указания к лабораторной работе по курсу «Теоретические основы электротехники» / С.С. Фролов; Оренбургский гос. ун-т. – Оренбург : ОГУ, 2010. – 27 с.

Основное содержание: теоретические сведения для выполнения лабораторной работы по изучению линейных реактивных цепей с сосредоточенными параметрами при синусоидальном воздействии на примере последовательных RC, RL- и RLC - цепей, варианты заданий аналитической и экспериментальной части, руководство по выполнению экспериментальной части, требования к оформлению отчёта, примеры вопросов и задач к защите, рекомендуемая литература.

Методические указания являются основным учебным руководством при выполнении лабораторных работ по курсу «ТОЭ» студентами специальности 210106.

УДК 621.382.002.56(07)
ББК 32.852я7

© Фролов С.С., 2010
© ГОУ ОГУ, 2010

Содержание

1	Задание на подготовку к выполнению лабораторной работы.....	4
2	Краткие сведения о методе комплексных амплитуд.....	5
2.1	Применимость метода	5
2.2	Практика применения.....	5
3	Задание на выполнение лабораторной работы	13
3.1	Аналитическая часть работы	13
3.2	Экспериментальная часть работы	15
4	Руководства и рекомендации к выполнению работы	17
4.1	Подготовка лабораторного рабочего места к эксперименту.....	17
4.2	Исследование RC -цепи.....	18
4.3	Исследование RL -цепи	22
4.4	Исследование RLC -цепи.....	23
5	Содержание отчёта.....	24
6	Примеры контрольных вопросов и задач к защите.....	25
7	Литература, рекомендуемая для изучения темы	26
	Список использованных источников	27

1 Задание на подготовку к выполнению лабораторной работы

Тема: Анализ линейных реактивных цепей синусоидального тока в установившемся режиме.

Цели работы:

- 1 Практическое освоение метода комплексных амплитуд на примере простейших RC -, RL - и RLC -цепей.
- 2 Изучение экспериментальных способов анализа гармонических токов и напряжений на примере RC -, RL - и RLC -цепей.

Время выполнения работы – 8 часов.

Выполнению данной работы должна предшествовать предварительная подготовка, состоящая в следующем:

- a) Изучение темы и цели лабораторной работы.
- b) При изучении теоретического материала в объеме материала лекций, учебных пособий и теоретического введения обратить внимание на следующие основные вопросы:
 - 1) закономерности протекания токов и напряжений в источниках энергии, линейных резистивных и реактивных элементах;
 - 2) основные теоретические положения метода комплексных амплитуд и методику его применения при расчёте линейных синусоидальных реактивных цепей.
- c) Изучение устройства приборов лабораторного рабочего места: монтажного наборного устройства для сборки исследуемых схем, генератора низкочастотных гармонических сигналов ГЗ-109 и осциллографа С1-114/1 (С1-114).
- d) Оформление заготовки для отчета (смотреть раздел 5).
- e) Выполнение указаний разделов 3 и 4.

2 Краткие сведения о методе комплексных амплитуд

Метод комплексных амплитуд (он же - символичный метод) позволяет упростить расчёт токов и напряжений в электрических *реактивных* цепях при синусоидальных воздействиях.

Фундаментальное обоснование и подробное описание метода приведено в многочисленных учебных пособиях по электротехнике и в лекционном материале. Поэтому в настоящем пособии к лабораторной работе автор ограничится кратким рассмотрением тех особенностей метода, которые необходимы для практического расчёта указанных в теме лабораторной цепей.

2.1 Применимость метода

Для цепи должны выполняться необходимые условия:

- в цепи могут содержаться активные источники энергии, токи и напряжения которых изменяются только по гармоническим законам с одной и той же частотой $\omega t = 2\pi \cdot f t$;
- указанные источники функционируют в цепи («включились» в цепь) достаточно давно. Настолько давно, что на момент анализа амплитуды и начальные фазы токов и напряжений на всех участках цепи установились и не меняются, то есть в цепи наступил установившийся гармонический режим.

2.2 Практика применения

Пусть требуется определить выражения для токов и/или напряжений некоторых участков цепи - например, для схемы рисунка 1,а - $u_{L2}(t)$, $u_{R1}(t)$, $i_2(t)$. Схема содержит *реактивные элементы* (ёмкости и катушки), а также гармонические источники напряжения и/или тока с одинаковой частотой $\omega t = 2\pi \cdot f t$. Например, для схемы рисунка 1,а это два источника ЕДС

$$e_1(t) = E_{m,1} \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_{E1}),$$

$$e_2(t) = E_{m,2} \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_{E2}),$$

и источник тока

$$j(t) = J_m \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_j),$$

Для решения поставленной задачи выполняются следующие шаги:

1 Составляется схема замещения исходной цепи (рисунок 1,б), в которой:

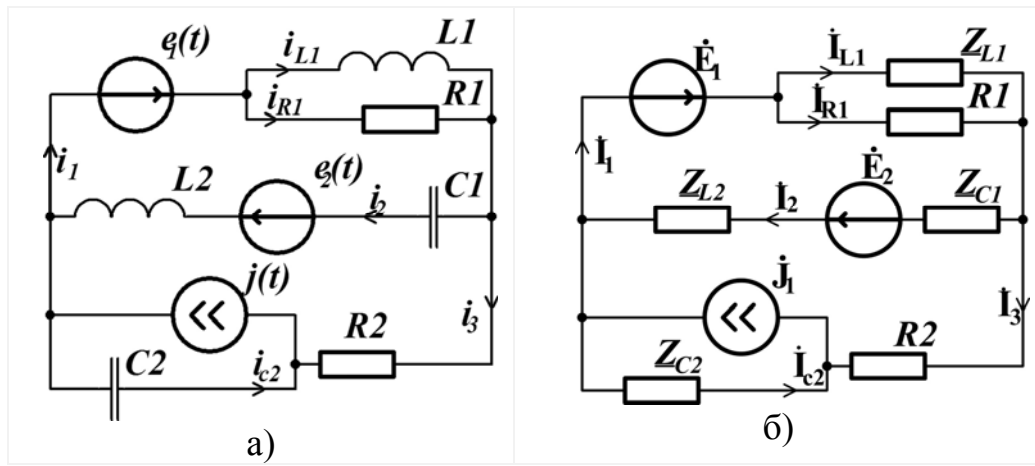


Рисунок 1

а) Гармонические источники заменяются источниками постоянных напряжений и токов, но с комплексными значениями (комплексными амплитудами). При этом модули комплексных амплитуд должны соответствовать амплитудам, а аргументы – начальным фазам соответствующих колебаний. Так в схеме рисунка 1,б параметры источников примут следующие значения:

$$\dot{E}_1 = E_{m,1} e^{j \cdot \varphi_{E1}},$$

$$\dot{E}_2 = E_{m,2} e^{j \cdot \varphi_{E2}},$$

$$\dot{J} = J_m e^{j \cdot \varphi_j}.$$

б) Индуктивности L_k заменяются комплексными индуктивными сопротивлениями с величиной

$$\underline{Z}_{Lk} = j\omega L_k,$$

или

$$\underline{Z}_{Lk} = j \cdot x_{Lk},$$

где - $x_{Lk} = \omega L_k$ - модуль сопротивления индуктивности L_k ,

- $k=1, \dots, p$ (для схем рисунка 1- $p=2$);

с) ёмкости C_l заменяются комплексными емкостными сопротивлениями

$$\underline{Z}_{Cl} = \frac{1}{j\omega C_l} = -\frac{j}{\omega C_l},$$

или

$$\underline{Z}_{Cl} = -j \cdot x_{Cl},$$

где - $x_{Cl} = \frac{1}{\omega C_l}$ - модуль сопротивления C_l ,

- $l=1, \dots, q$ (для схем рисунка 1 - $q=2$).

2) Для полученной резистивной цепи постоянного тока (рисунок 1,б) любым известным вам способом вычисляются соответствующие искомые токи и напряжения (\dot{U}_{L2} , \dot{U}_{C1} и \dot{I}_2 - для предлагаемого на рисунке 1 примера схемы). Только значения у найденных электрических величин будут комплексными, и значения эти также называются комплексными амплитудами.

3) В соответствии с вычисленными комплексными амплитудами получают аналитические выражения искомых гармонических токов и/или напряжений. При этом их амплитудам приравниваются модули, а начальным фазам – аргументы комплексных амплитуд. Так как в настоящей работе рассматриваются только линейные реактивные цепи, частота колебаний искомых гармонических величин соответствует частоте источников $\omega_0 = 2\pi f_0$. Для приведённого выше примера

$$u_{L2}(t) = U_{m,L2} \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_{U_{L2}}), \quad u_{C1}(t) = U_{m,C1} \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_{U_{C1}}), \quad i_2(t) = I_{m,2} \sin(\omega_0 \cdot t + \varphi_{I_2}), \quad (2.1)$$

где -
$$U_{m,L2} = |\dot{U}_{L2}|, \quad U_{m,C1} = |\dot{U}_{C1}|, \quad I_{m,2} = |\dot{I}_2|, \quad (2.2)$$

-
$$\varphi_{U_{L2}} = \arg(\dot{U}_{L2}), \quad \varphi_{U_{C1}} = \arg(\dot{U}_{C1}), \quad \varphi_{I_2} = \arg(\dot{I}_2). \quad (2.3)$$

Замечание 1: в студенческой и инженерной практике часто встречаются учебные или технические задачи, в которых источники энергии заданы различными гармоническими функциями – и косинусоидальной, и синусоидальной. В таком случае перед выполнением шага 1,а) выполняется следующее

- одна из функций (не важно - какая) берётся за базисную, или опорную;

- выражения источников, заданные небазисными функциями, приводятся к базисным с учётом фазовых соотношений между синусом и косинусом. Так, если за базисную функцию принят синус, косинусоидальные источники описываются синусоидальными функциями, а к их начальным фазам прибавляются 90° . При косинусоидальной базисной функции – наоборот, из начальных фаз преобразуемых выражений вычитается 90° (смотрите «Пример 1» ниже).

Пример 1. Требуется определить выражения для токов всех ветвей и падений напряжений на всех пассивных элементах и источнике тока схемы рисунка 2,а: $i_{R1}(t)$, $i_{C1}(t)$, $i_{L1}(t)$ $u_{LC}(t)=u_{11}(t)$, $u_{R1}(t)$. При этом дано:

$$1) \quad u(t)=10\sin(\omega_0 \cdot t + 30^\circ), \quad i(t)=0.005\cos(\omega_0 \cdot t - 30^\circ);$$

$$2) \quad f_0=31.83 \text{ кГц}, \quad R1=1 \text{ КОм}, \quad L1=5 \text{ мГн}, \quad C1=5 \text{ нФ}.$$

Решение:

1) Приняв за базисную функцию – функцию косинуса, преобразуем выражение для источника напряжения:

$$u(t)=10\cos(\omega_0 \cdot t + 30^\circ - 90^\circ)=10\cos(\omega_0 \cdot t - 60^\circ).$$

2) Формируем резистивную комплексную схему замещения (рисунок 2,б):

а) Определяем комплексные амплитуды источников аналогично (2.1-2.3):

$$\dot{\mathbf{U}} = 10e^{-j \cdot 60^\circ}, \quad \dot{\mathbf{I}} = 0.005e^{-j \cdot 30^\circ};$$

б) Определение значений комплексных сопротивлений:

$$\text{Циклическая частота:} \quad \omega_0 = 2\pi f_0 = 200 \cdot 10^3 \text{ рад/с}.$$

$$\text{Сопротивление ёмкости } C1: \quad x_{C1} = \frac{1}{\omega C1} = \frac{1}{2 \cdot 10^5 \cdot 5 \cdot 10^{-9}} = 1000 \text{ Ом},$$

$$Z_{C1} = -j \cdot x_{C1} = -j1000 \text{ Ом}.$$

$$\text{Сопротивление катушки } L1: \quad x_{L1} = \omega L1 = 2 \cdot 10^5 \cdot 0.005 = 1000 \text{ Ом},$$

$$Z_{L1} = j \cdot x_{L1} = j1000 \text{ Ом}.$$

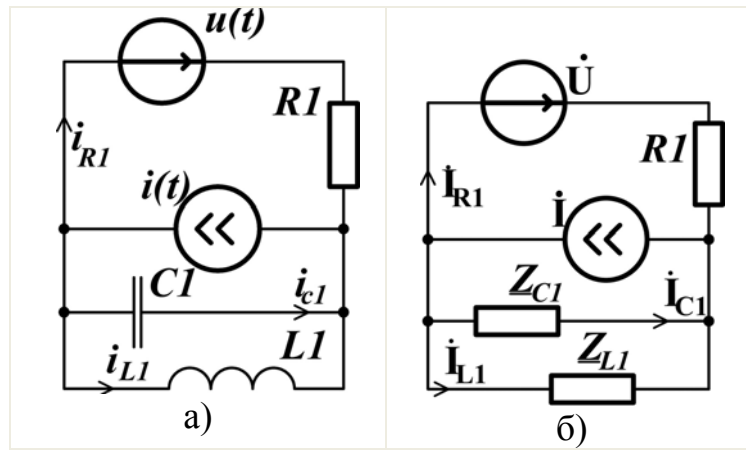


Рисунок 2

3) Расчёт комплексных величин токов и напряжений. Для расчёта применим любой известный метод анализа резистивных цепей постоянного тока, *совсем не-обязательно суперзаумный*. С законами Ома и Кирхгоффа на втором курсе знакомы все студенты-технари. Для цепи рисунка 2,б их применения вполне достаточно.

а) Поэтому для начала составляем систему уравнений Кирхгоффа.

По первому закону Кирхгоффа: $\dot{I}_{R1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{L1} = \dot{I}$.

По второму закону:

– для контура $\dot{U} - R1 - \underline{Z}_{C1}$: $\dot{I}_{R1} R1 - \dot{I}_{C1} \underline{Z}_{C1} = \dot{U}$;

– для контура $\underline{Z}_{C1} - \underline{Z}_{L1}$: $\dot{I}_{C1} \underline{Z}_{C1} - \dot{I}_{L1} \underline{Z}_{L1} = 0$.

б) Подставив известные значения, получим систему:

$$\begin{cases} \dot{I}_{R1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{L1} = 0.005e^{-j30^\circ} \\ 1000 \cdot (\dot{I}_{R1} + j\dot{I}_{C1}) = 10e^{-j60^\circ} \\ 1000j \cdot (-\dot{I}_{C1} - \dot{I}_{L1}) = 0 \end{cases} \Rightarrow \begin{cases} \dot{I}_{R1} + \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{L1} = 0.0025(\sqrt{3} - j1) \\ \dot{I}_{R1} + j\dot{I}_{C1} = 0.005(1 - j\sqrt{3}) \\ \dot{I}_{C1} + \dot{I}_{L1} = 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

с) Решая систему, вычисляем токи:

– из третьего уравнения системы (2.4): $\dot{I}_{L1} = -\dot{I}_{C1}$; (2.5)

– из второго уравнения: $\dot{I}_{R1} = 0.005(1 - j\sqrt{3}) - j\dot{I}_{C1}$; (2.6)

– подставляем (2.5) и (2.6) в первое уравнение системы:

$$0.005(1-j\sqrt{3})-j\dot{\mathbf{I}}_{C1}+\dot{\mathbf{I}}_{C1}-\dot{\mathbf{I}}_{C1}=0.005(1-j\sqrt{3})-j\dot{\mathbf{I}}_{C1}=0.0025(\sqrt{3}-j1)\Rightarrow$$

$$\Rightarrow \dot{\mathbf{I}}_{C1}=\frac{0.005-0.0025\sqrt{3}-j(0.005\sqrt{3}-0.0025)}{-j}=(-6.16-j0.67)10^{-3}\text{ A}=6.2\cdot 10^{-3}e^{-j174^{\circ}}\text{ A}^1; \quad (2.7)$$

– подставляем (2.7) в (2.5) и (2.6):

$$\dot{\mathbf{I}}_{L1}=-\dot{\mathbf{I}}_{C1}=(6.16+j0.67)10^{-3}\text{ A}=6.2\cdot 10^{-3}e^{j6^{\circ}}\text{ A}, \quad (2.8)$$

$$\dot{\mathbf{I}}_{r1}=(4.33-j2.5)10^{-3}\text{ A}=5e^{-j30^{\circ}}10^{-3}\text{ A}, \quad (2.9)$$

d) Вычисляем падения напряжений:

$$\text{– на резисторе: } \dot{\mathbf{U}}_{r1}=\dot{\mathbf{I}}_{r1}R1=5\cdot 10^{-3}e^{-j30^{\circ}}1000=5e^{-j30^{\circ}}\text{ В}; \quad (2.10)$$

– на источнике тока и LC -контуре:

$$\dot{\mathbf{U}}_{\Pi}=\dot{\mathbf{U}}_{L1}=\dot{\mathbf{U}}_{C1}=\dot{\mathbf{I}}_{L1}Z_{L1}=6.2\cdot 10^{-3}e^{j6^{\circ}}1000e^{j90^{\circ}}=6.2e^{j96^{\circ}}\text{ В}. \quad (2.11)$$

4) Получаем выражения для вычисления мгновенных значений:

$$\begin{aligned} \text{– из (2.7)} \quad & - \quad i_{C1}(t)=6.2\cdot 10^{-3}\sin(\omega 0\cdot t-174^{\circ}), a; \\ \text{– из (2.8)} \quad & - \quad i_{L1}(t)=6.2\cdot 10^{-3}\sin(2\cdot 10^5\cdot t+6^{\circ}), a; \\ \text{– из (2.9)} \quad & - \quad i_{r1}(t)=5\cdot 10^{-3}\sin(2\cdot 10^5\cdot t-30^{\circ}), a; \\ \text{– из (2.10)} \quad & - \quad u_{r1}(t)=5\sin(2\cdot 10^5\cdot t-30^{\circ}), \text{ в}; \\ \text{– из (2.11)} \quad & - \quad u_I(t)=u_{L1}(t)=u_{C1}(t)=6.2\sin(2\cdot 10^5\cdot t+96^{\circ}), \text{ в}. \end{aligned}$$

¹ Начинаящим «счетоводам» в области комплексного счисления - замечание №1: посчитав на калькуляторе аргумент полученного в данном примере числа по известному соотношению

$$\arg(\dot{\mathbf{I}}_{C1})=\arctg\left(\frac{\operatorname{Im}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})}{\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})}\right)=\arctg\left(\frac{-0.67}{-6.17}\right), \quad (*)$$

вы возразите автору – получится 6° , а не -174° . Но не забывайте следующее:

– область значений функции функции \arctg – $[-90^{\circ}, 90^{\circ}]$;

– калькулятору, при вычислении $\left(\frac{\operatorname{Im}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})}{\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})}\right)$ в выражении (*), абсолютно «параллельно», какой знак перед

действительной частью $\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})$ - его результат одинаков при сочетании комбинаций $\left\{\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})>0, \operatorname{Im}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})>0\right\}$ и $\left\{\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})<0, \operatorname{Im}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})<0\right\}$, или $\left\{\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})>0, \operatorname{Im}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})<0\right\}$ и $\left\{\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})<0, \operatorname{Im}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})>0\right\}$;

– однако, когда $\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})<0$, то вектор $\dot{\mathbf{I}}_{C1}$ находится в левой полуплоскости системы координат -

$90^{\circ}\leq\arg(\dot{\mathbf{I}}_{C1})\leq 270^{\circ}$. Но калькулятор выдаст результат, на 180° отличный от действительного. Для получения дей-

ствительного значения аргумента $\operatorname{Re}(\dot{\mathbf{I}}_{C1})<0$ необходимо эти 180° вычесть или прибавить (не важно).

Замечание №2: если при вычислениях аргумента пользуетесь функцией \arg (в том числе, на калькуляторе) - никаких поправок делать не нужно – все указанные выше нюансы в ней учтены.

Пример 2. Определить выражения для токов всех ветвей и падений напряжений на всех пассивных элементах схемы рисунка 3,а: $i_{L1}(t)$, $i_{C1}(t)$, $i_{R1}(t)$ $u_{C1}(t)=u_{R1}(t)$, $u_{L1}(t)$. Известно:

- 1) $u(t)=10\sin(\omega_0 \cdot t + 30^\circ)$; $f_0=31.83$ кГц,
- 2) $f_0=7.96$ кГц, $R1=100$ Ом, $L1=2$ мГн, $C1=200$ нФ.

Решение:

1) Получение комплексной схемы замещения (рисунок 3,б).

а) Комплексная амплитуда источника: $\dot{U}=10e^{j30^\circ}$;

б) Расчёт комплексных сопротивлений:

Циклическая частота: $\omega_0 = 2\pi f_0 = 50 \cdot 10^3 \text{ рад/с}$.

Сопротивление ёмкости $C1$: $x_{C1} = \frac{1}{\omega C1} = \frac{1}{5 \cdot 10^4 \cdot 2 \cdot 10^{-7}} = 100$ Ом, $Z_{C1} = -j100$ Ом.

Сопротивление катушки $L1$: $x_{L1} = \omega L1 = 5 \cdot 10^4 \cdot 0.002 = 100$ Ом, $Z_{L1} = j100$ Ом.

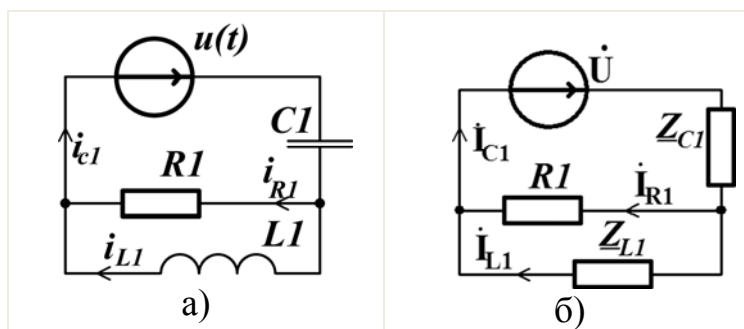


Рисунок 3

2) Расчёт схемы замещения:

а) Сопротивление параллельно соединённых $R1$ и Z_{L1} :

$$\underline{Z}_{R1,L1} = \frac{\underline{Z}_{L1}R1}{\underline{Z}_{L1}+R1} = \frac{100 \cdot j100}{100 + j100} = 50\sqrt{2}e^{j45^\circ} \text{ Ом} = 50 + j50 \text{ Ом}.$$

б) Общее сопротивление относительно зажимов источника:

$$\underline{Z} = \underline{Z}_{C1} + \underline{Z}_{R1,L1} = -j100 + 50 + j50 = 50 - j50 \text{ Ом} = 50\sqrt{2}e^{-j45^\circ} = 70.7e^{-j45^\circ} \text{ Ом}.$$

с) Величина тока конденсатора:

$$\dot{I}_{C1} = \frac{\dot{U}}{\underline{Z}} = \frac{10e^{j30^\circ}}{50\sqrt{2}e^{-j45^\circ}} = 0.1\sqrt{2}e^{j75^\circ} = 0.141e^{j75^\circ} \text{ А} = (37 + j137)10^{-3} \text{ А}.$$

d) Напряжение конденсатора:

$$\dot{U}_{C1} = \dot{I}_{C1} Z_{C1} = 0.1\sqrt{2}e^{j75^\circ} 100e^{-j90^\circ} = 10\sqrt{2}e^{-j15^\circ} = 14.1e^{-j15^\circ} \text{ В} = (13.7 - j3.7) \text{ В}.$$

e) Напряжение резистора и катушки:

$$\dot{U}_{R1} = \dot{U}_{L1} = \dot{I}_{C1} Z_{R1,L1} = 0.1\sqrt{2}e^{j75^\circ} 50\sqrt{2}e^{j45^\circ} = 10e^{j120^\circ} \text{ В} = -5 + j8.7 \text{ В}.$$

f) Ток резистора:

$$\dot{I}_{R1} = \frac{\dot{U}_{R1}}{R1} = \frac{10e^{j120^\circ}}{100} = 0.1e^{j120^\circ} \text{ А} = -0.05 + j0.087 \text{ А}.$$

g) Ток катушки:

$$\dot{I}_{L1} = \frac{\dot{U}_{L1}}{Z_{L1}} = \frac{10e^{j120^\circ}}{100j} = 0.1e^{j30^\circ} \text{ А} = 0.087 + j0.05 \text{ А}.$$

3 Выражения для мгновенных значений искомых величин:

$$- i_{C1}(t) = 0.141 \sin(\omega_0 \cdot t + 75^\circ), \text{ а};$$

$$- u_{C1}(t) = 14.1 \sin(5 \cdot 10^4 t - 15^\circ), \text{ в}; \quad u_{L1}(t) = u_{R1}(t) = 10 \sin(5 \cdot 10^4 \cdot t + 120^\circ), \text{ в};$$

$$- i_{R1}(t) = 0.1 \sin(5 \cdot 10^4 \cdot t + 120^\circ), \text{ а}; \quad i_{L1}(t) = 0.1 \sin(5 \cdot 10^4 \cdot t + 30^\circ), \text{ а}.$$

Замечание 2: во многих учебных, методических пособиях, технических документах при определении и расчёте комплексных электрических величин за их модуль принимается не амплитуды, а действующие значения соответствующих гармонических функций. При этом:

1) при переходе к комплексной схеме выражения (2.2,а-2.2,в) шага 1,а) методики изменяются следующим образом:

$$\dot{\mathbf{E}}_1 = \frac{E_{m,1}}{\sqrt{2}} e^{j \cdot \varphi_{E1}}, \quad \dot{\mathbf{E}}_2 = \frac{E_{m,2}}{\sqrt{2}} e^{j \cdot \varphi_{E2}}, \quad \dot{\mathbf{J}} = \frac{J_m}{\sqrt{2}} e^{j \cdot \varphi_j};$$

2) при определении выражений для мгновенных значений (2.1) выражение (2.2) для схемы рисунка 1,а изменится к виду:

$$U_{m,L2} = \sqrt{2} |\dot{U}_{L2}|, \quad U_{m,C1} = \sqrt{2} |\dot{U}_{C1}|, \quad I_{m,2} = \sqrt{2} |\dot{I}_2|.$$

3 Задание на выполнение лабораторной работы

3.1 Аналитическая часть работы

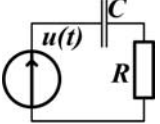
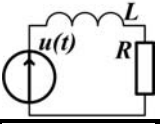
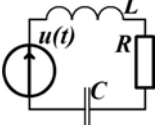
В таблице 3.1 представлены схемы простейших RC -, RL - и RLC -цепей, на входе которых действует источник гармонического напряжения $u(t) = U_m \sin(2\pi f \cdot t + \varphi_0)$, значения параметров элементов R , C , L и основных частот $f_{0,C}$, $f_{0,L}$ и $f_{0,LC}$ для различных вариантов $\alpha\beta$. Для всех схем $U_m = 1 В$ и $\varphi_0 = 0$.

1) Каждая бригада получает номер варианта $\alpha\beta$ и стенд с № β . Цифра α соответствует номеру подгруппы, β – номеру стенда.

2) Используя метод комплексных амплитуд, для RC -цепи:

а) полученные значения занести в таблицу 3.2 в столбики «р» («расчётные» величины); также занести в таблицу результаты промежуточных вычислений – значения емкостного сопротивления x_C , модуля полного сопротивления $|Z_{RC}|$ и его аргумента $\Delta\varphi_Z = \arg(Z_{RC})$;

Таблица 3.1 – Исходные данные к расчёту

Схема	Параметры	№20	№21	№22	№23	№24	№10	№11	№12	№13	№14
	C	11 нФ	10 нФ	220 нФ	22 нФ	68 нФ	110 нФ	10 нФ	220 нФ	2.2 нФ	6.8 нФ
	R	1.5 кОм	1 кОм	150 Ом	1.6 кОм	2 кОм	1.5 кОм	1 кОм	150 Ом	1.6 кОм	2 кОм
	$f_{0,C}$	10 кГц	15 кГц	5 кГц	5 кГц	1 кГц	1 кГц	15 кГц	5 кГц	50 кГц	10 кГц
	L	5 мГн	81 мГн	4 мГн	7 мГн	2.4 мГн	5 мГн	81 мГн	4 мГн	7 мГн	2.4 мГн
	R	1.5 кОм	1 кОм	150 Ом	1.6 кОм	2 кОм	1.5 кОм	1 кОм	150 Ом	1.6 кОм	2 кОм
	$f_{0,L}$	50 кГц	2 кГц	6 кГц	36 кГц	130 кГц	50 кГц	2 кГц	6 кГц	36 кГц	130 кГц
	C	11 нФ	10 нФ	220 нФ	22 нФ	68 нФ	110 нФ	10 нФ	220 нФ	2.2 нФ	6.8 нФ
	L	5 мГн	81 мГн	4 мГн	7 мГн	2.4 мГн	5 мГн	81 мГн	4 мГн	7 мГн	2.4 мГн
	R	1.5 кОм	1 кОм	150 Ом	1.6 кОм	2 кОм	1.5 кОм	1 кОм	150 Ом	1.6 кОм	2 кОм
	$f_{0,LC}$	20 кГц	5.6 кГц	5.5 кГц	12 кГц	12 кГц	6 кГц	5.6 кГц	5.5 кГц	40 кГц	40 кГц

б) для каждого из указанных в 2,а) напряжений для каждой частоты составить аналитические выражения для мгновенных значений $u_R(t)$ и $u_C(t)$;

с) для одной из частот ($0.5f_{0,C}$, $f_{0,C}$ или $2f_{0,C}$) в программной среде MathCad построить на одном графике диаграммы $u(t)$, $u_R(t)$, $u_C(t)$;

d) для всех частот построить векторные диаграммы \dot{U} , \dot{U}_R и \dot{U}_C , а также тока \dot{I} (для каждой частоты – в одной системе координат).

3) Также используя метод комплексных амплитуд, для RL -цепи:

a) вычислить амплитуды U_R , U_L и начальные фазы $\Delta\phi_R$, $\Delta\phi_L$ колебаний напряжений на резисторе и катушке при трех значениях частоты $f = 0.5f_{0,L}$, $f = f_{0,L}$ и $f = 2f_{0,L}$;

Таблица 3.2 – Результаты анализа RC -цепи

f_0	x_C , Ом	$ Z_{RC} $, Ом	$\Delta\phi_Z$	$U_{R,B}$		$U_{C,B}$		$\Delta\phi_R$		$\Delta\phi_C$	
				р	э	р	э	р	э	р	э
$0.5f_{0C} =$											
$f_{0C} =$											
$2f_{0C} =$											

b) полученные значения занести в таблицу 3.3 в столбики «р»; также занести результаты промежуточных вычислений $-x_L$, $|Z_{RL}|$ и аргумента $\Delta\phi_Z = \arg(Z_{RL})$;

c) аналогично 2,с), для всех вычисленных напряжений составить и записать аналитические выражения $u_R(t)$ и $u_L(t)$;

d) для одной из частот f в программной среде MathCad построить на одном графике диаграммы $u(t)$, $u_R(t)$ и $u_L(t)$ (2-3 периода);

e) для всех частот f построить векторные диаграммы \dot{U} , \dot{U}_R и \dot{U}_L , а также тока \dot{I} (для каждой из частот – в одной системе координат).

Таблица 3.3 – Результаты анализа RL -цепи

f_0	x_L , Ом	$ Z_{RL} $, Ом	$\Delta\phi_Z$	$U_{R,B}$		$U_{L,B}$		$\Delta\phi_R$		$\Delta\phi_L$	
				р	э	р	э	р	э	р	э
$0.5f_{0L} =$											
$f_{0L} =$											
$2f_{0L} =$											

4) Для RLC -цепи:

а) вычислить амплитуды U_R , U_L , U_C и начальные фазы $\Delta\varphi_R$, $\Delta\varphi_L$, $\Delta\varphi_C$ при трех значения частоты $f = 0.5f_{0,LC}$, $f = f_{0,LC}$ и $f = 2f_{0,LC}$;

б) полученные значения, а также результаты промежуточных вычислений $-x_L$, x_C , $|Z_{RLC}|$ и $\Delta\varphi_Z = \arg(Z_{RLC})$ занести в таблицу 3.4;

Таблица 3.4 – Результаты анализа RLC -цепи

f_0	x_L , Ом	x_C , Ом	$ Z_{RLC} $, Ом	$\Delta\varphi_Z$	U_R, B		U_L, B		U_C, B		$\Delta\varphi_R$		$\Delta\varphi_L$		$\Delta\varphi_C$	
					р	э	р	э	р	э	р	э	р	э	р	э
$0.5f_{0L} =$																
$f_{0L} =$																
$2f_{0L} =$																

с) для всех вычисленных комплексных напряжений составить и записать аналитические выражения $u_R(t)$, $u_C(t)$ и $u_L(t)$;

д) для одного из значений частоты f в программной среде MathCad построить диаграммы $u(t)$, $u_R(t)$, $u_C(t)$ и $u_L(t)$ на одном графике;

е) для всех частот f построить векторные диаграммы \dot{U} , \dot{U}_R и \dot{U}_L , а также тока \dot{I} (для каждой частоты – в одной системе координат).

3.2 Экспериментальная часть работы

Получив у преподавателя макетный стенд №3 для монтажа исследуемых цепей, выполнить следующую работу:

1) Исследовать RC -цепь:

а) на макетном стенде собрать RC -цепочку (схема рисунка 4), подключив к ней также осциллограф С1-114/1 (С1-114) и генератор ГЗ-109 - в качестве источника гармонического напряжения;

б) измерить амплитуды U_R , U_C и начальные фазы $\Delta\varphi_R$, $\Delta\varphi_C$ колебаний напряжений на резисторе и конденсаторе при трех значения частоты генератора $f = 0.5f_{0,C}$, $f = f_{0,C}$ и $f = 2f_{0,C}$ и амплитуде его колебаний $U_m = 1$ В.

2) Исследование RL -цепи: собрав на макетном стенде RL -цепочку по (рисунк 5), измерить амплитуды U_R , U_L и начальные фазы $\Delta\varphi_R$, $\Delta\varphi_L$ колебаний напряжений на резисторе и катушке при трех значения частоты генератора $f = 0.5f_{0,L}$, $f = f_{0,L}$ и $f = 2f_{0,L}$ и амплитуде $U_m = 1\text{ В}$.

3) Исследование RLC -цепи: собрав на макетном стенде RLC -цепь (рисунок 6), измерить амплитуды U_R , U_L , U_C и начальные фазы $\Delta\varphi_R$, $\Delta\varphi_L$, $\Delta\varphi_C$ при трех значения частоты генератора $f = 0.5f_{0,LC}$, $f = f_{0,LC}$ и $f = 2f_{0,LC}$ и амплитуде $U_m = 1\text{ В}$.

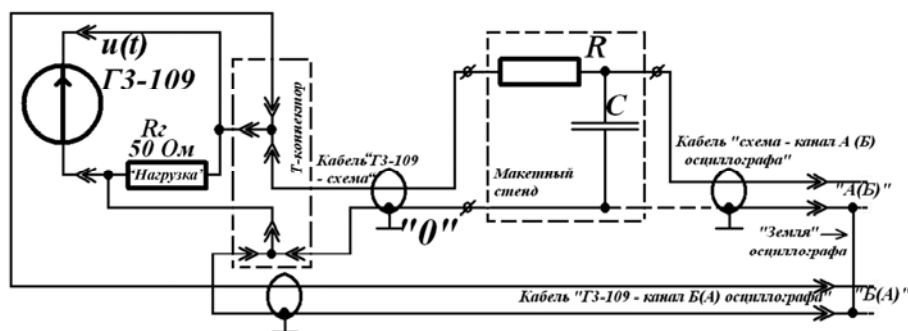


Рисунок 4 – Схема для измерения $u_C(t)$ в RC -цепи

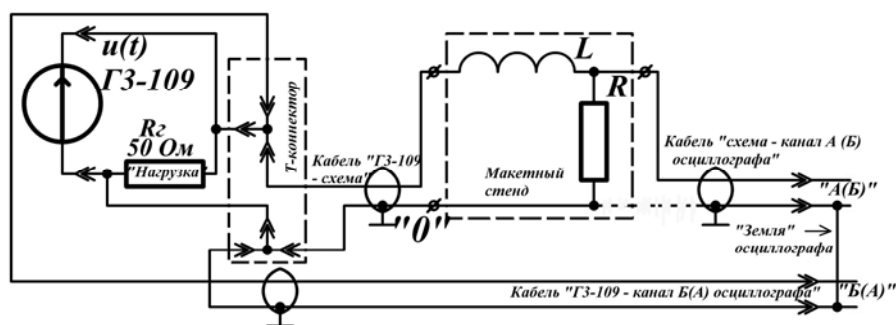


Рисунок 5 – Схема для измерения $u_R(t)$ в RL -цепи

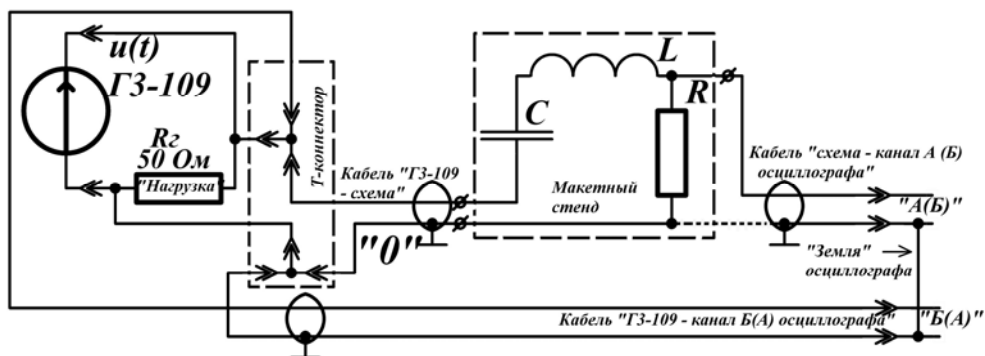


Рисунок 6 – Схема для измерения $u_R(t)$ в RLC -цепи

4 Руководства и рекомендации к выполнению работы

Для выполнения аналитической части достаточно материалов теоретического введения раздела 2. После освоения метода рекомендуется выполнять расчёты в программной среде MathCad (... но только после освоения метода !!!). Далее в настоящем разделе автор ограничиться рекомендациями по выполнению экспериментальной части работы.

4.1 Подготовка лабораторного рабочего места к эксперименту

4.1.1 Перед началом эксперимента и включением приборов проверить:

- целостность конструкций измерительных приборов и макетного стенда (корпусов, креплений, регуляторов гнезд и тому подобного);
- целостность высоковольтных сетевых кабелей, вилок, розеток, комплектность розеток;
- целостность полученных монтажных проводов, коаксиальных кабелей и нагрузки «50 Ом».

4.1.2 На измерительных приборах проверить рабочие положения регулирующих органов:

а) регулятор режима «НАГРУЗКА» генератора ГЗ-109 должен находиться на позиции «АТТ»;

б) рабочие положения регуляторов и кнопок осциллографа С1-114/1 (С1-114):

- 1) плавного регулятора масштаба «V/ДЕЛ» и «ВРЕМЯ/ДЕЛ» - крайнее правое (без усилия повернуть по часовой стрелке до щелчка или упора);
- 2) дискретных регуляторов масштаба «V/ДЕЛ» - от «2» до «0.5» V/ДЕЛ»;
- 3) дискретный регулятор масштаба «ВРЕМЯ/ДЕЛ» - не должен находиться в положении «плавно»;
- 4) регуляторы положения лучей « \leftrightarrow » - грубо», и « \updownarrow » - приблизительно в среднем положении;

- 5) кнопка усиления напряжения канала «Б» - «x5» - отжата;
- 6) кнопка растяжения масштаба по времени – «x10» - отжата;
- 7) кнопки режимов синхронизации «сеть», «внешн/внутр» и «НЧ» - отжаты;
- 8) кнопки режимов синхронизации «АВТ/ЖДУЩ», «ОДНОКР», «ГОТОВ», «+/-» и «~/≅» - отжаты;
- 9) кнопка инвертирования сигнала канала «А» - отжата;
- 10) кнопки включения каналов «А» и «Б» - нажаты;
- 11) синхронизация по каналу генератора ГЗ-109 «А» или «Б» (в зависимости от подключения).

4.1.3 Включить осциллограф, и после предварительного его «прогрева» (высокое напряжение анода пушки появляется через 19 - 22 с):

- подрегулировать «ЯРКОСТЬ», «ФОКУС» и «АСТИГМАТИЗМ»;
- удостовериться в наличии лучей на экране – если одного или обоих нет - подкручивая «↔» и «↑», вывести лучи на экран.

4.2 Исследование RC-цепи

4.2.1 Собрать схему рисунка 4. При этом:

- RC-цепочка на *макетном стенде* собирается соединительными проводками (элементы не соединены внутри стендов!!!);
- не забыть параллельно выходу ГЗ-109 подключить согласующую нагрузку $R_2=50\text{ Ом}$ (смотреть внимательно схему рисунка 4);
- вывод «земли» кабеля «схема – канал А (Б) осциллографа» (рисунок 4) рекомендуется к RC-цепи не подсоединять - после сборки схемы указанный вывод автоматически подключается к *общей* точке «0» через металлический корпус – «землю» осциллографа (рисунок 4);
- начинающим электронщикам рекомендуется пригласить специалиста–руководителя проверить сборку.

4.2.2 Настроить частоту колебаний генератора ГЗ-109 $f = 0.5f_{0,C}$ (переключатель «множитель частоты» и плавный регулятор «17.7...200» на генераторе).

4.2.3 Настроить амплитуду колебаний входного напряжения (напряжения генератора) $U_m = 1$ В. При настройке рекомендуется выполнить следующее:

- установить масштаб «V/ДЕЛ» канала генератора Б(А) осциллографа - «1V/ДЕЛ» или «0.5V/ДЕЛ»;

- удерживая кнопку « \perp » канала генератора Б(А) и подкручивая соответствующий регулятор « \updownarrow », установить его луч в любое из положений рисунка 7,а - либо «0», либо «-1 кл.», либо «+1 кл.»;

- установить масштаб «ВРЕМЯ/ДЕЛ» - δt - из расчёта, чтобы на экране умещалось 2-4 периода сигнала: $\frac{0.2}{f} \leq \delta t \leq \frac{0.4}{f}$;

- установить переключатель диапазонов генератора в положение «1.5V»;

- по верхней шкале вольтметра генератора установить действующее напряжение $U_0 \approx 0.7$ В...0.71 В (этим настройка амплитуды не закончилась);

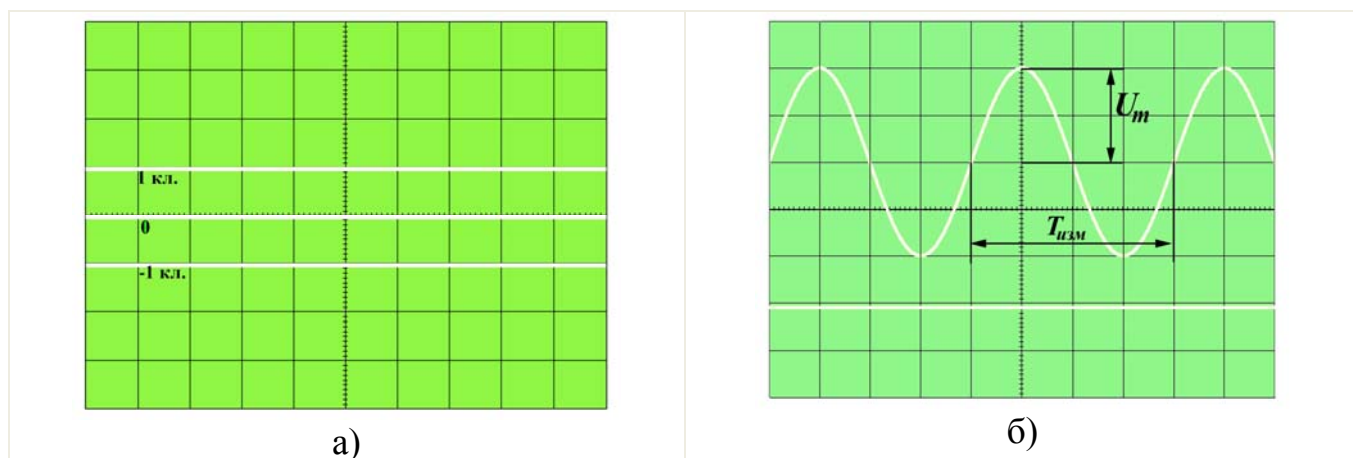


Рисунок 7

- засинхронизировать картинку – подкручивая «УРОВЕНЬ», добиться устойчивого изображения синусоиды;

- измерив период полученного сигнала $T_{изм}$ (рисунок 7,б) и вычислив частоту $f_{изм} = 1/T_{изм}$, удостовериться в соответствии $f = f_{изм} \pm 0.05f_{изм}$. При расхождении более чем на 5% обратиться к руководителю работ;

– подкручивая « \leftrightarrow », переместить максимум (или минимум) сигнала на условно – главную ось Oy (рисунок 7,б);

– подкручивая *плавный регулятор напряжения* на ГЗ-109, следя за амплитудой колебаний его сигнала на экране осциллографа (рисунок 7,б), подрегулировать (уточнить) величину $U_m = 1\text{ В}$.

4.2.4 Измерить амплитуду колебаний напряжений на конденсаторе U_C . При измерении рекомендуется:

– установить минимально-возможный масштаб «V/дел» (максимально возможную чувствительность усиления) измерительного канала А(Б), при котором изображение сигнала «наибольшее», но и не выходит за пределы шкалы экрана (рисунок 8,а);

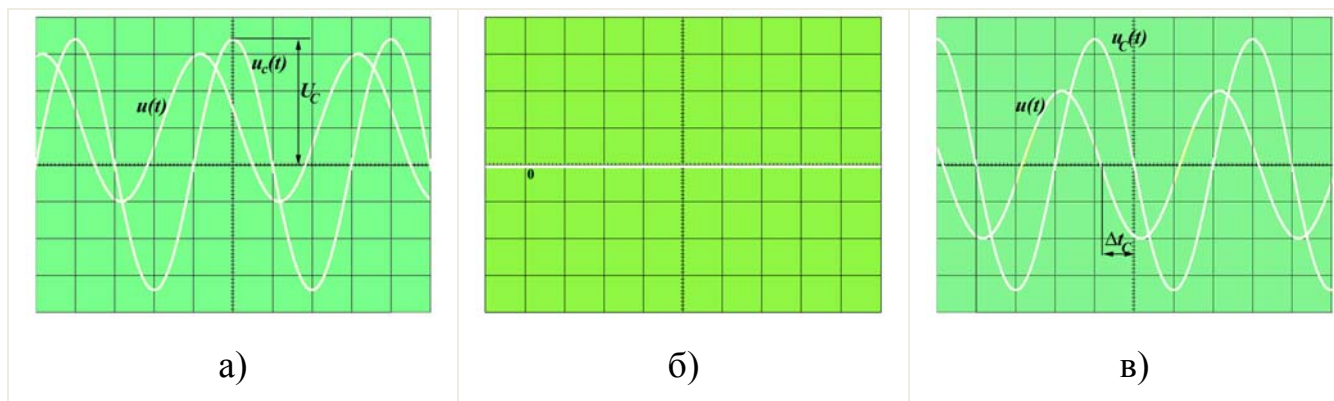


Рисунок 8

– подкручивая « \leftrightarrow », переместить максимум (или минимум) измеряемого сигнала на условно – главную ось Oy (рисунок 8,а);

– зафиксировать результат измерения U_C в соответствующий столбик «э» таблицы 3.2, сравнить с расчётным значением.

4.2.5 Измерить разность фаз $\Delta\varphi_C$ между сигналами напряжений на конденсаторе $u_C(t)$ и на входе $u(t)$. При измерении выполняются следующие действия:

– нажав кнопки « \perp » каждого канала и подкручивая регуляторы « \updownarrow », установить лучи в положение «0» (совмещённые лучи на рисунке 8,б);

– рекомендуется, подкручивая « \leftrightarrow », переместить лучи так, чтобы точка перехода через ноль одного из сигналов (либо $u_C(t)$, либо $u(t)$ - не важно) находилась в условном начале координат (рисунок 8,в);

– измерить время запаздывания между сигналами $u_C(t)$ и $u(t)$ - Δt_C (рисунок 8,в). При этом, если выходной сигнал $u_C(t)$ запаздывает относительно входного $u(t)$ (пересекает Ox по времени *позже*, чем входной - опорный) – считать Δt_C отрицательным, в противном случае – положительным;

– вычислить величину сдвига фаз с помощью выражения:

$$\Delta\varphi_C = \frac{\Delta t_C}{T_{изм}} 360^\circ = \Delta t_C \cdot f \cdot 360^\circ,$$

где f - настроенная текущая частота; результат зафиксировать в таблицу 3.2 в соответствующий столбик «э», сравнить с расчётным результатом.

4.2.6 Измерить амплитуду U_R и начальную фазу $\Delta\varphi_R$ колебаний напряжений на конденсаторе. При этом выполнить следующие действия:

– изменить схему рисунка 4 – получить схему рисунка 9. При этом вместо конденсатора C параллельно измерительному каналу А (Б) подключается резистор R , генератор остался подключенным к RC -цепи и к каналу Б(А) осциллографа. Для изменения соединения достаточно поменять местами выводы кабеля «ГЗ-109 - схема». (Как этот «фокус» получается, обязательно разберитесь сами – на самом деле он несложный. Если не разберётесь в нём сейчас – никакие «методические рекомендации» за оставшиеся четыре года электроники из Вас не сделают.);

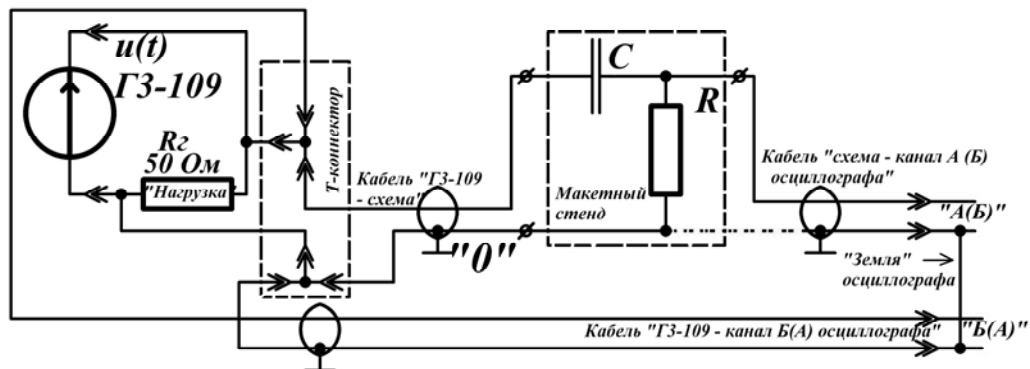


Рисунок 9 - Схема для измерения $u_R(t)$ в RC -цепи

– выполнить действия пунктов 4) и 5) настоящего подраздела.

4.2.7 Измерить U_R , U_C , $\Delta\varphi_C$ и $\Delta\varphi_R$ при $f = f_{0,C}$ и $f = 2f_{0,C}$. Для каждой из указанных частот:

– вернуться к схеме рисунка 4 – вернуть выводы кабеля «ГЗ-109 - схема» обратно;

– повторить действия пунктов 2) – 6) настоящего подраздела.

4.3 Исследование RL -цепи

4.3.1 Собрать схему рисунка 5, руководствуясь рекомендациями пункта 4.2.1.

4.3.2 Настроить частоту колебаний генератора ГЗ-109 $f = 0.5f_{0,L}$.

4.3.3 Удостовериться - амплитуда колебаний входного напряжения - $U_m = 1$ В.

Если нет - руководствоваться рекомендациями пункта 4.2.3.

4.3.4 Пользуясь рекомендациями пункта 4.2.4, измерить амплитуду колебаний напряжений на резисторе U_R . Результат измерения зафиксировать в соответствующий столбик «э» таблицы 3.3 и сравнить с расчётным;

4.3.5 По рекомендациям пункта 4.2.5, измерить разность фаз $\Delta\varphi_R$ между напряжениями на резисторе $u_R(t)$ и на входе $u(t)$. Результат зафиксировать в соответствующий столбик «э» таблицы 3.3 и сравнить с расчётным результатом;

4.3.6 Измерить амплитуду U_L и начальную фазу $\Delta\varphi_L$ колебаний напряжений на конденсаторе. При этом выполнить следующие действия:

– изменить схему рисунка 5 так, чтобы параллельно измерительному каналу А (Б) вместо резистора R подключилась индуктивность L (схема рисунка 10) - поменять местами выводы кабеля «ГЗ-109 - схема»;

– выполнить действия пунктов 4.3.4 и 4.3.5 настоящего подраздела.

4.3.7 Измерить U_R , U_L , $\Delta\varphi_R$ и $\Delta\varphi_L$ при $f = f_{0,L}$ и $f = 2f_{0,L}$ по алгоритму:

– вернуться к схеме рисунка 5;

– повторить действия пунктов 4.3.2 – 4.3.6 настоящего подраздела.

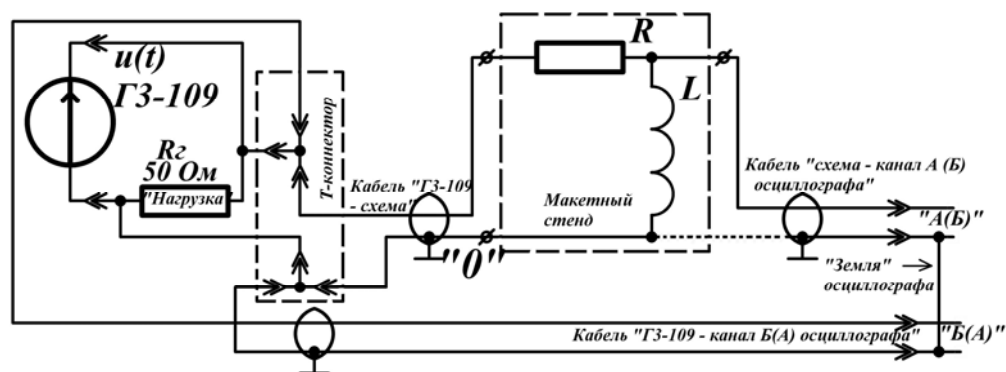


Рисунок 10 - Схема для измерения $u_L(t)$ в RL -цепи

4.4 Исследование RLC -цепи

4.4.1 Руководствуясь рекомендациями пункта 4.2.1, собрать схему рисунка 6.

4.4.2 Настроить частоту колебаний генератора ГЗ-109 $f = 0.5 f_{0,LC}$.

4.4.3 Удостовериться - амплитуда колебаний входного напряжения - $U_m = 1$ В.

Если нет - руководствоваться рекомендациями пункта 4.2.3.

4.4.4 Пользуясь рекомендациями пункта 4.2.4, измерить амплитуду колебаний напряжений на резисторе U_R . Результат измерения зафиксировать в соответствующий столбик «э» таблицы 3.4 и сравнить с расчётным;

4.4.5 Пользуясь рекомендациями пункта 4.2.5, измерить разность фаз $\Delta\varphi_R$ между сигналами напряжений на резисторе $u_R(t)$ и на входе $u(t)$. Результат зафиксировать в соответствующий столбик «э» таблицы 3.4 и сравнить с расчётным результатом;

4.4.6 Измерить амплитуду U_L и начальную фазу $\Delta\varphi_L$ колебаний напряжений на конденсаторе. При этом выполнить следующее:

- собрать схему рисунка 11;
- выполнить действия пунктов 4.4.4 и 4.4.5.

4.4.7 Измерить амплитуду U_C и начальную фазу $\Delta\varphi_C$ колебаний напряжений на конденсаторе. При этом:

- собрать схему рисунка 12;
- выполнить действия пунктов 4.4.4 и 4.4.5.

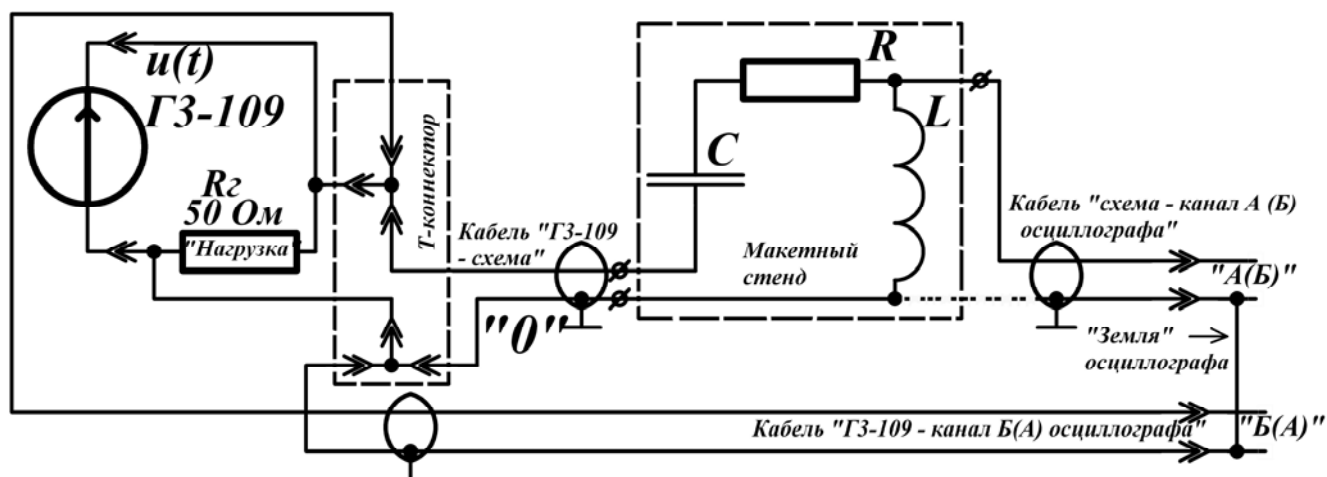


Рисунок 11 - Схема для измерения $u_L(t)$ в RLC -цепи

4.4.8 Измерить U_R , U_C , U_L , $\Delta\varphi_R$, $\Delta\varphi_C$ и $\Delta\varphi_L$ при $f = f_{0,LC}$ и $f = 2f_{0,LC}$. Для каждой частоты:

- вновь собрать схему рисунка 6;
- повторить действия пунктов 2) – 8) настоящего подраздела.

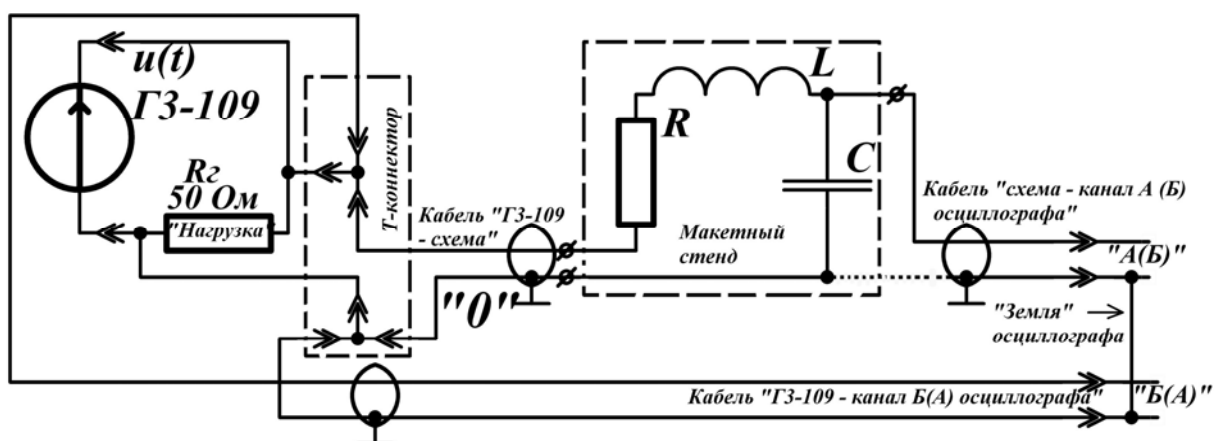


Рисунок 12 - Схема для измерения $u_C(t)$ в RLC -цепи

5 Содержание отчёта

1) Титульный лист, оформленный в программной среде MatchCad или MicrosoftWord, согласно правилам оформления расчётно-графических работ, рефератов или отчётов по практике - приложение Ц или Ю в [1] (имеется электронный вариант в файле standart.doc или на сайте университета).

2) Тема и цель лабораторной работы.

3) Оформление аналитических и экспериментальных результатов исследования RC -цепи:

- электрическая схема RC -цепи – из таблицы 3.1;
- аналитический расчёт (рукописный вариант или «человеческая» распечатка из программной среды MathCad);
- распечатки из программной среды MathCad временных диаграмм напряжений пункта 2,d) подраздела 3.2;
- одна из измерительных схем RC – цепи (рисунка 4 или 9);
- таблица с результатами вычислений и измерений;
- выводы о соответствии расчётных и аналитических результатах исследования, анализ факторов, влияющих на точность измерения.

4) Оформление аналитических и экспериментальных результатов исследования RL -цепи – аналогично пункту 3.

5) Оформление аналитических и экспериментальных результатов исследования RLC -цепи – аналогично пункту 3.

Оформлять работу в электронном виде в программной среде MatchCad или MicrosoftWord, формат страниц - А4.

6 Примеры контрольных вопросов и задач к защите

1) Какие электрические цепи являются реактивными? В каких случаях они линейны?

2) Какие задачи позволяет решать метод комплексных амплитуд? Ограничения применимости метода.

3) Возможно ли рассчитать реактивные сопротивления RLC -цепи из таблицы 3.2 при:

- a) импульсном воздействии $u(t)$ (рисунок 13,а);
- b) треугольном воздействии (рисунок 13,б).

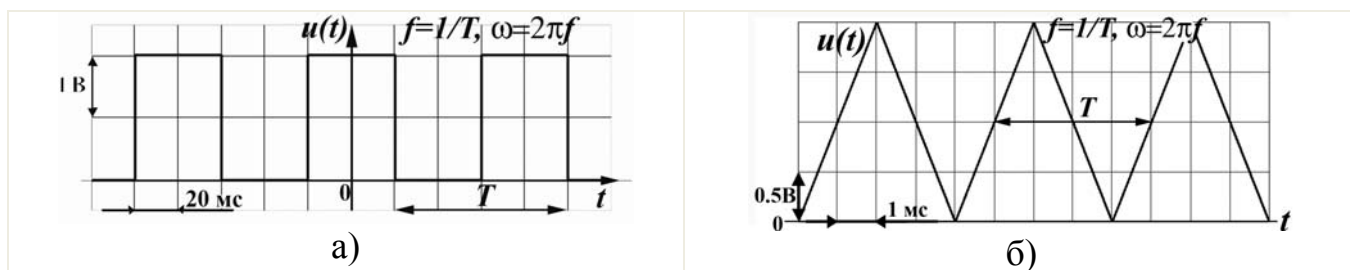


Рисунок 13

4) Определить сдвиг фаз между сигналами:

- a) рисунка 8,в;
- b) рисунка 8,а

при произвольной частоте.

5) Определить аналитически сдвиг фаз между током и напряжением:

- a) конденсатора;
- b) индуктивности;
- c) резистора.

6) Определить сдвиг фаз между напряжениями катушки и конденсатора в последовательном RLC -контуре.

7) Рассчитать и построить векторную диаграмму токов и напряжений для реактивной цепи, заданной преподавателем.

8) Определить активную, реактивную и полную мощности реактивной цепи, заданной преподавателем.

9) Составить измерительную схему и разработать методику измерения величины индуктивности катушки с помощью последовательной RL -цепочки, синусоидального генератора и двухканального осциллографа.

7 Литература, рекомендуемая для изучения темы

7.1 Теоретические основы электротехники. Электрические цепи : учебник / Л.А. Бессонов - 11-е изд., испр. и доп. – М. : Гардарики, 2007. - 701 с. - ISBN 5-8297-0159-6.

- 7.2 Теоретические основы электротехники: Курс лекций / В.А. Прянишников.- 3-е изд., перераб. и доп. - СПб. : Корона принт, 2000. - 368с. : ил. - Библиогр.: с. 366. - ISBN 5-7931-0104-7.
- 7.3 Основы анализа электрических цепей : линейные цепи: учеб. для вузов / П. Н. Матханов .- 3-е изд., перераб. и доп. - М. : Высш. шк., 1990. - 400 с. : ил. - ISBN 5-06-000679-4.
- 7.4 Линейные электрические цепи постоянного и синусоидального тока [Электронный ресурс] / С.Н. Бравичев, Л.В. Быковская. - Оренбург: ОГУ, 2001. – 43 с.
- 7.5 Осциллограф универсальный С1-114/1 (или С1-114): в 2 ч.: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1988. - Часть 1.
- 7.6 ГЗ-109. Генератор сигналов низкочастотный: Техническое описание и инструкция по эксплуатации. – 1984.

Список использованных источников

- 1 Стандарт предприятия. Общие требования и правила оформления выпускных квалификационных работ, курсовых проектов (работ), отчетов по РГР, по УИРС, по производственной практике и рефератов: СТП 101-00. – введ. 2002-12-25. - Оренбург: ОГУ, 2002. – 62 с.