

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗВЕТВЛЕННОЙ ЛИНЕЙНОЙ ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Руководство к лабораторной работе №3 по дисциплине
«Основы теории цепей» и «Теория электрических цепей» для
студентов радиотехнического факультета
всех специальностей

Разработчики:
доцент кафедры ТОР
И.В. Мельникова,
доцент кафедры ТОР
Б.Ф. Голев
доцент кафедры ТОР
К.Ю. Дубовик

Оглавление

1. Цель работы.....	3
2. Краткие теоретические сведения и исходная информация.....	3
3. Домашнее задание	6
4. Лабораторное задание	8
4.1 Подготовка лабораторного оборудования	8
4.2 Измерение узловых напряжений	8
4.3 Проверка выполнения первого закона Кирхгофа для токов ветвей	9
4.4 Проверка выполнения второго закона Кирхгофа для напряжений на элементах	10
5. Методические указания по обработке результатов эксперимента	10
6. Контрольные вопросы	13
7. Список литературы	15

1. Цель работы

1) Закрепление навыков расчета и измерения комплексных значений напряжений и токов электрических цепей.

2) Экспериментальная проверка выполнения законов Кирхгофа в комплексной (векторной) форме.

2. Краткие теоретические сведения и исходная информация

– Лабораторная работа выполняется бригадой из 2-3 человек. За каждой бригадой закрепляется рабочее место (стенд). Студентам в бригаде присваивается порядковый номер.

– Бригада исследует оба варианта схем рисунка 2.1 на частоте, соответствующей варианту. Студенты с нечетными порядковыми номерами выполняют расчет для схемы а), с четными – для схемы б).

– Номер варианта соответствует номеру рабочего места по таблице 2.1 или задается преподавателем.

Таблица 2.1.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, кГц	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5

– Напряжение на входе цепи $U_{BX} = U_{10} = 1В$.

– Параметры элементов заданы в табл.2.2.

Таблица 2.2

№ макета	R, Ом	L ₁ , мГн	C ₁ , мкФ	L ₂ , мГн	C ₂ , мкФ
1	100	6,37	0,095	8,69	0,186
2	100	6,66	0,093	8,86	0,18
3	100	6,22	0,093	8,51	0,184
4	100	6,2	0,092	8,63	0,186
5	100	6,5	0,095	8,41	0,182
6	100	6,32	0,097	8,64	0,187
7	100	6,34	0,095	8,63	0,188
8	100	6,23	0,093	8,23	0,184

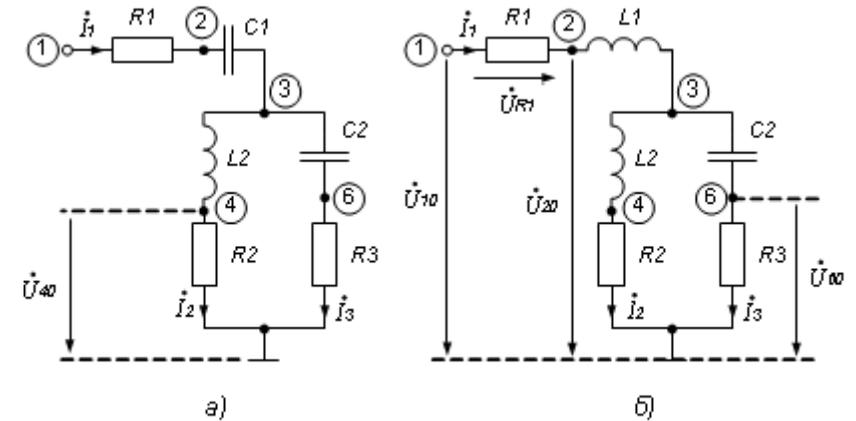


Рисунок 2.1

Схемы на рис. 2.1 с помощью эквивалентных преобразований можно привести к схеме, представленной на рис.2.2.

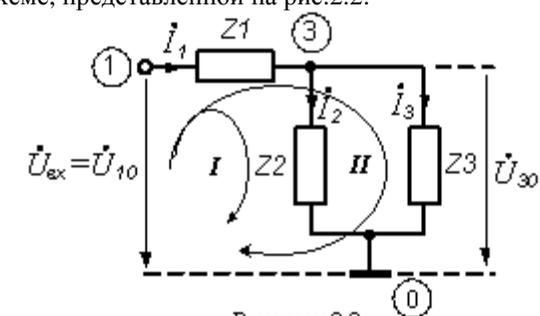


Рисунок 2.2

На рис. 2.2 сопротивления Z1, Z2, Z3 определяются как последовательное соединение двух элементов.

Для расчета токов и напряжений на элементах используются закон Ома и два закона Кирхгофа в комплексной форме. Основные расчетные соотношения приведены ниже:

Сопротивление индуктивности определяется выражением (2.1):

$$\dot{Z}_L = j\omega L = \omega L \cdot e^{+j90^\circ}, |Z_L| = X_L = \omega L, \quad (2.1)$$

емкостное сопротивление определяется выражением, представленным ниже:

$$\dot{Z}_C = \frac{1}{j\omega C} = -j \frac{1}{\omega C} = \frac{1}{\omega C} \cdot e^{-j90^\circ}, |Z_C| = |X_C| = \frac{1}{\omega C}, \quad (2.2)$$

где ω – частота входного сигнала, L и C – значение индуктивности или емкости.

Входное сопротивление участка цепи с последовательным соединением двух сопротивлений имеет вид:

$$\dot{Z}_{\text{посл}} = \dot{Z}_1 + \dot{Z}_2. \quad (2.3)$$

Входное сопротивление участка цепи с параллельным соединением двух сопротивлений имеет вид:

$$\dot{Z}_{\text{парал}} = \frac{\dot{Z}_1 \cdot \dot{Z}_2}{\dot{Z}_1 + \dot{Z}_2} \quad (2.4)$$

Закон Ома для участка линейной цепи в комплексной форме определяется выражением (2.5):

$$\dot{U} = \dot{I} \cdot \dot{Z} \rightarrow \dot{I} = \frac{\dot{U}}{\dot{Z}}, \quad (2.5)$$

где \dot{U} – напряжение, приложенное к зажимам участка электрической цепи

\dot{I} – ток через участок цепи;

\dot{Z} – комплексное сопротивление участка цепи;

I-ый закон Кирхгофа - алгебраическая сумма комплексных токов в любом узле равна нулю (знак тока определяется направлением тока относительно узла):

$$\sum \dot{I} = 0, \quad (2.6)$$

Исходя из вышесказанного для электрической цепи рис.2.2 узел 3 I-ый закон Кирхгофа будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0. \quad (2.6a)$$

II-ой закон Кирхгофа - алгебраическая сумма комплексных значений напряжений на элементах ветвей в любом замкнутом контуре равна нулю (знак напряжения определяется его направлением относительно обхода контура):

$$\sum \dot{U} = 0, \quad (2.7)$$

Тогда для электрической цепи рис.2.2 II-ый закон Кирхгофа для первого контура будет выглядеть следующим образом:

$$\dot{U}_{Z1} + \dot{U}_{Z2} - \dot{U}_{\text{вх}} = 0. \quad (2.7a)$$

Для второго контура соответственно будет иметь вид выражения (2.7б):

$$\dot{U}_{Z1} + \dot{U}_{Z3} - \dot{U}_{\text{вх}} = 0. \quad (2.7б)$$

На основании уравнений (2.6а), (2.7а), (2.7б) запишем систему уравнений для решения комплексных токов ветвей:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 - \dot{I}_2 - \dot{I}_3 = 0 \\ \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_1 + \dot{I}_2 \cdot \dot{Z}_2 - \dot{U}_{\text{вх}} = 0 \\ \dot{I}_1 \cdot \dot{Z}_1 + \dot{I}_3 \cdot \dot{Z}_3 - \dot{U}_{\text{вх}} = 0 \end{cases} \quad (2.8)$$

После определения токов ветвей необходимо воспользоваться законом Ома, чтобы определить искомые напряжения отдельных участков цепи.

3. Домашнее задание

1) Изучить методы расчета токов, напряжений, баланса мощностей в комплексной форме, методы построения векторных диаграмм /Л1, Л2/;

2) Изобразить электрическую схему исследуемой цепи (рис.2.1 а,б). На схеме обозначить узлы, элементы цепи, произвести разметку токов ветвей, узловых напряжений и напряжений на элементах с указанием условно положительных направлений. Указать номер макета, частоту, номиналы элементов схемы;

Рекомендуемый порядок расчета:

1) В соответствии с вариантом вычислить значения Z_{L1} , Z_{L2} и Z_{C1} , Z_{C2} (2.1) и (2.2) на заданной частоте. Представить полученные значения в алгебраической и показательной форме. Результаты занести в табл.3.1;

2) вычислить значения сопротивлений Z_1 , Z_2 и Z_3 (рис.2.1), как последовательное соединение отдельных элементов. Занести полученные результаты в таблицу 3.1, как в алгебраической, так и показательной форме;

Таблица 3.1

	$R + jX$	$ Z $	φ_Z
	<i>Ом</i>	<i>Ом</i>	<i>град</i>
Z_{L1}			
Z_{L2}			
Z_{C1}			
Z_{C2}			
Z_1			
Z_2			
Z_3			
Z_{23}			
$Z_{\text{вх}}$			

3) в соответствии с выражением (2.4) вычислить сопротивление Z_{23} как параллельное соединение элементов Z_2 и Z_3 (рис.2.2). Занести полученный результат в табл.3.1;

4) С помощью выражения (2.3) вычислить входное сопротивление цепи $Z_{\text{вх}}$ как последовательное соединение Z_{23} и Z_1 . Занести в табл.3.1;

5) по закону Ома (2.5) вычислить ток \dot{I}_1 , результат занести в табл.3.2(расчет). $\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_{\text{вх}}}{Z_{\text{вх}}}$;

6) по закону Ома вычислить напряжение $\dot{U}_{30} = \dot{I}_1 \cdot Z_{23}$;

7) по закону Ома (2.5) вычислить токи \dot{I}_2 и \dot{I}_3 (см. рис. 2.2). Значения токов занести в табл.3.2 «расчет» и проверить выполнение первого закона Кирхгофа, построив векторную диаграмму токов в масштабе 0,5 мА/см

8) вычислить значения комплексных напряжений на всех элементах схемы по закону Ома $\dot{U} = \dot{I} \cdot Z$. Для этого использовать результаты таблиц 3.1 и 3.2. Результаты расчетов свести в таблицу 3.3 «расчет»;

9) вычислить и свести в таблицу 3.4 комплексные значения узловых напряжений \dot{U}_{20} , \dot{U}_{40} , \dot{U}_{60} (см. рис.3.1), используя второй закон Кирхгофа:

$$\begin{aligned} \dot{U}_{10} = \dot{U}_{R1} + \dot{U}_{20} &\rightarrow \dot{U}_{20} = \dot{U}_{10} - \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{U}_{40} = \dot{I}_2 R_2; &\quad \dot{U}_{60} = \dot{I}_3 R_3. \end{aligned}$$

Таблица 3.2

Токи ветвей	\dot{I}_1		\dot{I}_2		\dot{I}_3	
	$ \dot{I}_1 $, мА	φ_{I_1} , град	$ \dot{I}_2 $, мА	φ_{I_2} , град	$ \dot{I}_3 $, мА	φ_{I_3} , град
Расчет						
Эксперимент						

Таблица 3.3

Напряжение на элементах схемы	Расчет		Эксперимент	
	$ \dot{U} $, В	φ_U	$ \dot{U} $, В	φ_U
\dot{U}_{R1}				
\dot{U}_{C1} (или \dot{U}_{L1})				
\dot{U}_{L2}				
\dot{U}_{R2}				
\dot{U}_{C2}				
\dot{U}_{R3}				

Таблица 3.4

Узловые напряжения	\dot{U}_{20}		\dot{U}_{30}		\dot{U}_{40}		\dot{U}_{60}		\dot{U}_{R1}	
	$ \dot{U}_{20} $, В	$\varphi_{U_{20}}$, град	$ \dot{U}_{30} $, В	$\varphi_{U_{30}}$, град	$ \dot{U}_{40} $, В	$\varphi_{U_{40}}$, град	$ \dot{U}_{60} $, В	$\varphi_{U_{60}}$, град	$ \dot{U}_{R1} $, В	$\varphi_{U_{R1}}$, град
Расчет										
Эксперимент										

4. Лабораторное задание

4.1 Подготовка лабораторного оборудования

1) Включить программу PCLab2000L, ярлык которой расположен на рабочем столе. На экране появится основное диалоговое окно программы;

2) Соединить выход генератора PCSGU250, (разъем GENERATOR), с сигнальной и общей шиной макета «Линейные цепи 1»;

3) Включить режим генерации гармонического сигнала и установить действующее значение сигнала VRMS, значение которого указывает преподаватель;

4) С помощью окна установки частоты установить частоту входного сигнала в соответствии с вариантом задания (табл.2.1);

5) Подключить к сигнальной шине макета синий провод кабелей CH1 и CH2 осциллографа PCSGU250, а к общей шине соответствующие коричневые жилы.

6) Запустить осциллограф, нажав кнопку RUN;

7) Включить режим отображения первого и второго каналов осциллографа (режим On), и установить режим автоматического выбора режима отображения, Autoset. На экране осциллографа должен появиться синусоидальный сигнал;

8) Меняя положение движков смещения / Position, кнопок чувствительности каналов от 3V до 10mV и кнопок Time/Div, добиться, чтобы на экране осциллографа отображалось 2-2.5 периодов гармонического сигнала;

9) убедиться, что напряжения на входах первого и второго каналов идентичны;

4.2 Измерение узловых напряжений

1) Собрать схему (рис. 3.3а) для измерения узловых напряжений, установив переключки с гнезда 1 на сигнальную шину и с гнезда 5 на общую шину;

- 2) На входе генератора установить напряжение $U_{ex} = \mathbf{1B}$;
- 3) Измерить первым каналом осциллографа и занести в табл.3.4. действующие значения и фазы узловых напряжений цепи \dot{U}_{20} , \dot{U}_{30} , \dot{U}_{40} и \dot{U}_{60} . Для этого сигнальный провод осциллографа подключать к гнездам 2, 3, 4, 6 и проводить измерения соответствующих узловых напряжений;
- 4) Результаты измерений сравнить с расчётными и, в случае существенного расхождения (более 10%), обратиться к преподавателю.
- 5) Поменять положение дополнительных перемычек, как показано на рис.3.3б;
- 6) Измерить значение напряжение в гнезде 2 (напряжение U_{R1}). Результаты занести в табл. 3.4;
- 7) После измерений графы табл.3.4 «эксперимент» должны быть полностью заполнены.

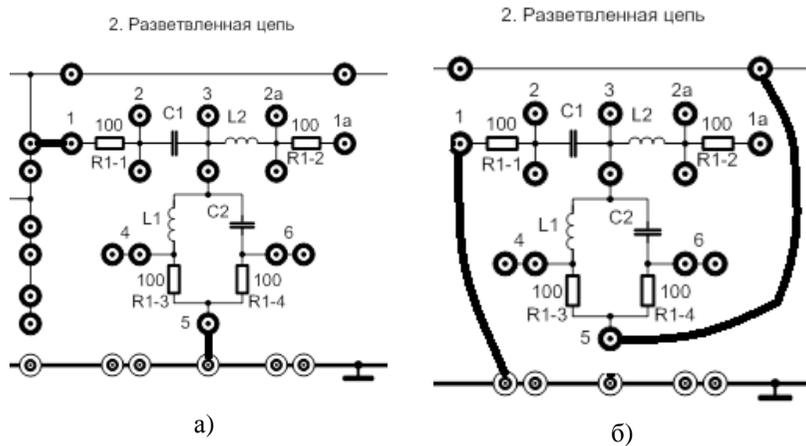


Рисунок 3.3. Схема экспериментальной установки

4.3 Проверка выполнения первого закона Кирхгофа для токов ветвей

- 1) Косвенным методом определить комплексные токи ветвей в соответствии с законом Ома на основании измеренных напряжений $\dot{U}_{40} = \dot{U}_{R2}$, $\dot{U}_{60} = \dot{U}_{R3}$ и заданных значений сопротивлений $R2=R3=100$ Ом;
- 2) Сравнить с расчётными значениями, и, в случае существенного расхождения (более 10%), обратиться к преподавателю;
- 3) Построить векторы токов \dot{I}_2 и \dot{I}_3 в масштабе $0,5 \text{ mA/cm}$. При построении пользоваться транспортиром.
- 4) В соответствии с первым законом Кирхгофа найти ток \dot{I}_1 (графический способ).

- 5) Определить ток \dot{I}_1 экспериментально (косвенным методом), используя закон Ома и напряжение \dot{U}_{R1} , и приняв $R1=100$ Ом. Результат измерения на основе \dot{U}_{R1} занести в табл.3.2;
- 6) сравнить значения тока \dot{I}_1 , полученные графически, экспериментально и расчетным путем;

4.4 Проверка выполнения второго закона Кирхгофа для напряжений на элементах

- 1) По результатам таблицы 3.4 и указаний п.5 А. вычислить действующие значения и фазы напряжений на элементах цепи \dot{U}_{R1} , \dot{U}_{C1} , \dot{U}_{L1} , \dot{U}_{L2} , \dot{U}_{C2} , \dot{U}_{R2} , \dot{U}_{R3} . Результаты занести в табл.3.3;
- 2) Выполнить обработку результатов эксперимента.

Задание второму студенту бригады

Второй студент в бригаде повторяет измерения п.п.4.2 и 4.3 для схемы рис. 2.1б).

5. Методические указания по обработке результатов эксперимента

На основе полученных измерений каждому студенту необходимо:
 А. Выполнить расчеты напряжений на элементах.

Для этого необходимо воспользоваться самим определением напряжения, что напряжение это разность потенциалов между двумя точками.

$$U_{12} = \varphi_1 - \varphi_2, \quad (5.1)$$

Вычислить все значения напряжений на элементах, используя значения узловых потенциалов из табл.3.4. Результаты занести в табл. 3.3

Б. Построить векторную лучевую диаграмму токов.

Построить в масштабе $0,5 \text{ mA/cm}$ векторную лучевую диаграмму токов ветвей (см. методические указания), полученных экспериментально. При построении пользоваться транспортиром.

Убедиться в выполнении первого закона Кирхгофа.

В. Определить значения комплексных напряжений на элементах цепи графическим способом

Построить лучевую векторную диаграмму узловых напряжений. Принять масштаб напряжения $0,1 \text{ V/cm}$. Начало отсчета напряжений совместить с началом отсчета токов, т.е. лучи тока и лучи узловых напряже-

ний должны исходить из одной точки. На диаграмме напряжений указать номера узлов. Диаграммы токов и напряжений изобразить разным цветом.

Построить топографическую диаграмму напряжений исследуемой цепи, производя графическое вычитание векторов узловых напряжений (см. Метод. указания). На основании второго закона Кирхгофа определить комплексные напряжения на элементах цепи (графический способ). Результаты сравнить с результатами из табл. 3.4 «эксперимент».

Векторные диаграммы

Векторные диаграммы отображают взаимное расположение напряжений и (или) токов. Длина вектора отображает в масштабных единицах величину напряжения (тока), а угол наклона вектора равен начальной фазе напряжения (тока).

На *лучевых диаграммах* все векторы исходят из одной точки. На диаграмме узловых напряжений начало вектора соответствует напряжению нулевого узла, т.е. нулю, а конец вектора – узловому напряжению \dot{U}_K . Направление вектора берется от начала координат к соответствующему узлу.

Пример расположения векторов \dot{U}_{20} и \dot{U}_{30} представлен на рис. 5.1:

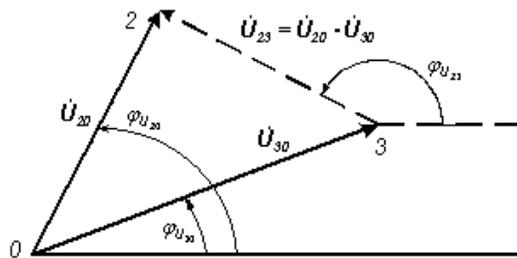


Рисунок 5.1 Графический расчет напряжения на элементе

На *топографических диаграммах* электрических цепей расположение векторов напряжения строго соответствует расположению элементов (ветвей) на схеме: начало вектора напряжения последующего элемента примыкает к концу вектора напряжения предыдущего элемента.

Напряжение на ветви $\dot{U}_{K1} = \dot{U}_K - \dot{U}_1$, включенной между k -м и 1 -м узлами, по известным узловым напряжениям определяется по правилам вычитания векторов. На рис. 5.1 результирующий вектор \dot{U}_{23} соединяет концы векторов \dot{U}_{30} и \dot{U}_{20} и направлен в сторону уменьшаемого вектора \dot{U}_{20} .

Г. Рассчитать комплексные мощности на элементах цепи.

Используя экспериментальные значения напряжений на элементах и токов ветвей, вычислить комплексную мощность для каждого элемента цепи

$$\dot{P}_S = \dot{U} \cdot I^* = U e^{j\varphi_U} \cdot I e^{-j\varphi_I} \quad (5.2)$$

Сделать заключение о характере мощности (активная, реактивная, комплексная) на элементах разного типа (сопротивлении, индуктивности, емкости).

Проверить выполнение баланса комплексных мощностей, расчеты занести в отчет по лабораторной работе.

Энергетические соотношения

Комплексную мощность \dot{P}_S на элементе следует рассчитывать как произведение комплексного напряжения на элементе, определенного в подразделе и комплексно-сопряженного тока, протекающего через этот элемент.

При оформлении отчета все расчеты выполняются следующим образом:

$$\dot{P}_{SL2} = \dot{U}_{L2} \cdot I_2^* = \boxed{\text{Числовая подстановка}} = \boxed{\text{Ответ в показательной форме}}$$

Рисунок 5.2 Пример оформления расчетов

Баланс мощностей – сумма комплексных мощностей, потребляемых всеми ветвями электрической цепи, равна нулю (*следует учитывать направление тока и напряжения на элементе*):

$$\sum_{k=1}^N \dot{U}_k I_k^* = 0, \quad (5.3)$$

где k – номер элемента схемы,

N – общее число элементов схемы, включая источник сигнала.

Если представить всю схему относительно источника сигнала, как входное сопротивление (рис. 5.3), то суммарная комплексная мощность в исследуемой схеме: $\dot{P}_{\Sigma} = \dot{U}_{\text{вх}} \cdot I_1^*$. При питании схемы от идеального источника сигнала $\dot{U}_{\text{вх}} = \dot{E}$ комплексная мощность источника сигнала определяется выражением (5.4):

$$\dot{P}_{SE} = -\dot{E} \cdot I_1^*, \quad (5.4)$$

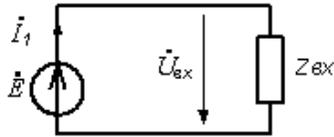


Рисунок 5.3 Эквивалентная схема замещения участка цепи

При питании схемы от генератора с ненулевым внутренним сопротивлением ($R_i \neq 0$) рис.5.4, комплексная мощность определяется выражением (5.5):

$$\dot{P}_{SE} = -\dot{U}_{xx} \cdot I_1^* = -\dot{E} \cdot I_1^*. \quad (5.5)$$

6. Контрольные вопросы

1) Поясните, почему в цепях с параллельным соединением R и L или R и C нельзя проверить выполнение первого закона Кирхгофа с помощью миллиамперметров в каждой ветви схемы. В каких типах цепей можно продемонстрировать этот закон с помощью миллиамперметров?

2) Поясните, почему даже в одноконтурной RC-цепи нельзя проверить выполнение второго закона Кирхгофа с помощью вольтметров. Можно ли это сделать в одноконтурной RL-цепи; RR-цепи; LL-цепи; CC-цепи?

3) Схема фрагмента цепи с общим током \dot{I} изображена на рис. 6.1, вольтметры **V1**, **V2**, **V3** измеряют узловые потенциалы в точках **3,4,5**. Поясните, можно ли и почему с помощью двух вольтметров определить падение напряжения на емкости $|\dot{U}_C|$, на сопротивлении $|\dot{U}_R|$ и на всей ветви $|\dot{U}_{RC}|$?

4) Используя обозначения рис. 6.1 запишите выражения для тока \dot{I} через узловые потенциалы \dot{U}_{30} , \dot{U}_{40} и \dot{U}_{50} .

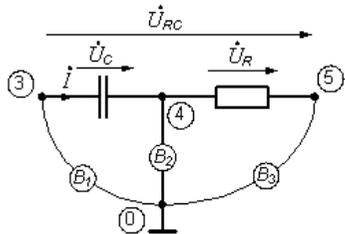


Рисунок 6.1

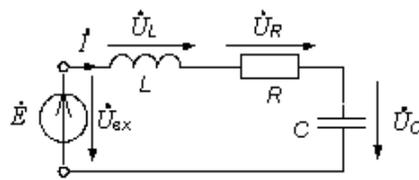


Рисунок 6.2

5) Поясните, чем отличаются лучевые и топографические векторные диаграммы; постройте их для схемы рис.6.2 при условиях а), б), в) табл.6.1, где все напряжения в вольтах, ток в амперах.

Таблица 6.1

Вариант	\dot{E}	\dot{i}	$ \dot{U}_L $	$ \dot{U}_R $	$ \dot{U}_C $
а)	10	1	10	10	10
б)	10	$0,5+j0,5$	$5\sqrt{2}$	$5\sqrt{2}$	$10\sqrt{2}$
в)	10	$0,5-j0,5$	$10\sqrt{2}$	$5\sqrt{2}$	$5\sqrt{2}$

6) По данным табл.6.1 определите входное сопротивление цепи для вариантов а), б), в) при последовательном соединении элементов (рис.6.2).

7) Используя основное выражение для комплексной мощности на любом участке цепи $\dot{P}_S = \pm \dot{U} \cdot \dot{I}^*$, получите для пассивного участка с сопротивлением Z (или проводимостью Y) еще четыре разных выражения, включающие либо сопротивление, либо проводимость.

8) По данным табл.6.1 вычислите мощность, потребляемую цепью, схема которой приведена на рис.6.2.

9) Проверьте выполнение баланса мощностей для схемы рис.6.2 по данным табл.6.1.

10) Поясните, что изменится в Ваших векторных диаграммах и почему, если положить, что начальная фаза входного сигнала $\varphi_{U_{вх}} = 90^\circ$ или $\varphi_{U_{вх}} = -90^\circ$.

11) Поясните, что изменится в Ваших векторных диаграммах и почему, если величину входного сигнала изменить в два раза, в пять раз.

12) Поясните термин «узловое напряжение».

13) На рис.6.3 приведены фрагменты схем с указанием сопротивления элементов в омах для некоторой частоты ω_1 ; вычислите значение тока на частоте ω_1 , если узловые напряжения \dot{U}_{10} и \dot{U}_{20} на этой частоте имеют следующие значения:

Таблица 6.2

Вариант	1	2	3	4	5
\dot{U}_{10} , В	40	$80e^{j90^\circ}$	$50e^{j90^\circ}$	$20e^{-j90^\circ}$	30
\dot{U}_{20} , В	$40e^{-j90^\circ}$	80	$150e^{-j90^\circ}$	20	60

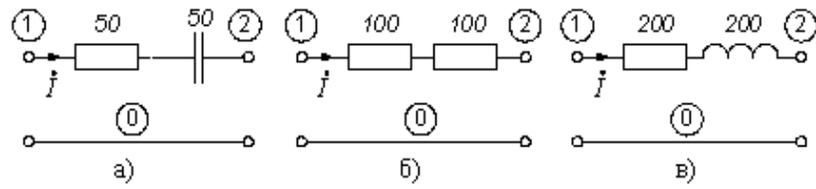


Рисунок 6.3

7. Список литературы

1. Попов В.П. Основы теории цепей.- М.: Высш.шк.,2005.-574с.(252 экз.)
2. Атабеков Г.И. Основы теории цепей.- СПб: Лань,2009.-432с. Режим доступа: http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_cid=25&pl1_id=95