

Федеральное агентство по образованию  
ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)

Кафедра телекоммуникаций и основ радиотехники

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАКОНОВ ОМА И КИРХГО- ФА В ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИ- ЧЕСКОМ ВОЗДЕЙСТВИИ**

Руководство к лабораторной работе №2 по дисциплине  
«Основы теории цепей» для студентов радиотехнического фа-  
культета всех специальностей

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

Томск 2011

## СОЖЕРЖАНИЕ

Лабораторная работа №2

Исследование законов Ома и Кирхгофа в электрической цепи при гармоническом воздействии

1. Цель работы.....	3
2. Исходная информация.....	3
3. Программа работы .....	5
3.1 Домашнее задание .....	5
3.2 Исследование выполнения законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии для последовательного соединения катушки индуктивности $L$ и резистора $R_1$ .....	5
3.3 Исследование выполнения законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии для последовательного соединения конденсатора $C$ и резистора $R_1$ .....	8
3.4 Исследование выполнения законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии для последовательного соединения сопротивлений $R_1$ и $R_4$ .....	9
3.5 Выводы по работе.....	10
4. Методические указания.....	10
5. Контрольные вопросы .....	12
Список литературы .....	15

## 1. Цель работы

Освоение методов измерения напряжения, тока и разности фаз гармонических сигналов.

Экспериментальная проверка топологических уравнений для цепей первого порядка и закона Ома в комплексной форме для индуктивности  $L$ , емкости  $C$  и сопротивления  $R$ .

## 2. Исходная информация

Исследованию подлежат цепи из последовательно соединенных элементов  $RL$ ,  $RC$  и  $RR$ . Они расположены на панели «Линейные цепи – 1» в верхнем левом углу.

Параметры элементов:  $L=30\text{мГн}$ ,  $C=0,03\text{мкФ}$ ,  $R=1\text{кОм}$ . Входное напряжение  $U_{\text{вх}}=1\text{В}$ .

Лабораторная работа выполняется бригадой из 2-3 человек. За каждой бригадой закрепляется рабочее место (стенд). Студентам в бригаде присваивается порядковый номер. Номер варианта соответствует номеру рабочего места по таблице 2.1, или задается преподавателем. Каждый студент в бригаде проводит расчет и эксперимент на индивидуально заданной частоте.

Таблица 2.1

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
Частота, кГц (нечетные №)	3	4	5	6	7	8	9	9,5
Частота, кГц (четные №)	13	14	10	11	12	13,5	14,5	15,5

Источником гармонических напряжений служит генератор звуковых сигналов ГЗ-53.

Действующие значения гармонического напряжения на входе и элементах цепи измеряются вольтметром ВЗ-38.

Начальная фаза комплексного напряжения определяется по фазометру.

**Справка:** фазометр Ф2-1М служит для измерения разности начальных фаз двух гармонических напряжений в диапазоне 20Гц – 100кГц. Если «опорный» вход фазометра подключить ко входу цепи, а «сигнальный» вход к выходу цепи, то фазометр покажет разницу начальных фаз  $\varphi_{U_{\text{вх}}\omega} - \varphi_{U_{\text{вых}}\omega}$ . Далее начальную фазу опорного сигнала  $\dot{U}_{\omega}$  принимаем



Аргумент дробного выражения

$$\operatorname{arg} \dot{T} = \varphi_T = \varphi_{\dot{e} \dot{u}} - \varphi_{\dot{c} \dot{i}},$$

где  $\varphi_{\dot{e} \dot{u}} = \operatorname{arctg} \frac{b}{a}, \quad \varphi_{\dot{c} \dot{i}} = \operatorname{arctg} \frac{c}{d}.$

### 3. Программа работы

В работе исследуются соотношения между напряжениями и током в последовательном соединении RL, RC и RR (рис.3.1).

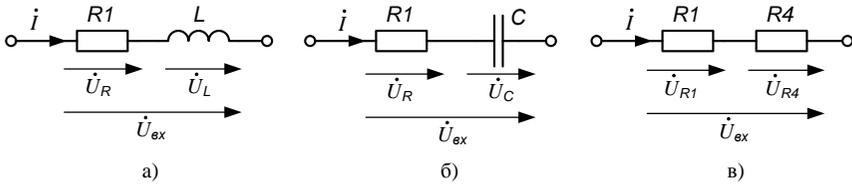


Рисунок 3.1

#### 3.1 Домашнее задание

По рекомендуемой литературе /1, с.40-46, 72-101; 2, с.48-59/ и методическим указаниям к данной работе изучить:

- соотношения между током и напряжением на элементах R, L, C (компонентные уравнения) для мгновенных значений и при гармоническом воздействии;
- основы метода комплексных амплитуд;
- законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме;
- методику и схемы измерения действующего значения и начальной фазы напряжения и тока для последовательно соединенных элементов.

#### 3.2 Исследование выполнения законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии для последовательного соединения катушки индуктивности L и резистора R1.

3.2.1 Рассчитать ток и напряжение на элементах RL-цепи. Расчетная схема, обозначения элементов и условно положительные направления напряжений и тока представлены на рис.3.1а). Начальную фазу напряжения  $\dot{U}_{AO}$  принять равной нулю. Результаты расчета занести в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 Последовательное соединение RL.  
Частота  $f = \frac{\quad}{\Gamma\text{ц}}$ ,  $U_{BX} = IB$

	$\frac{U_{RL}}{B}$	$\varphi_{UR}^\circ$	$\frac{U_L}{B}$	$\varphi_{UL}^\circ$	$I, \text{mA}$	$\varphi_I^\circ$	$RI, \text{Ом}$	$L, \text{мГн}$	$\omega L, \text{Ом}$
расчет							1000	30	
эксперимент									

Расчетные соотношения:

$$\dot{U}_L = \dot{U}_{\hat{A}\hat{O}} \frac{j\omega L}{R + j\omega L}; \quad |\dot{U}_L| = U_{\hat{a}\hat{o}} \frac{\omega L}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}};$$

$$\varphi_{UL} = 90^\circ - \arctg \frac{\omega L}{R};$$

$$\dot{U}_R = \dot{U}_{\hat{A}\hat{O}} \frac{R}{R + j\omega L}; \quad |\dot{U}_R| = U_{\hat{a}\hat{o}} \frac{R}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}$$

$$\varphi_{UR} = -\arctg \frac{\omega L}{R};$$

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_R}{R}; \quad |\dot{i}| = \frac{U_{\hat{A}\hat{O}}}{\sqrt{R^2 + \omega^2 L^2}}; \quad \varphi_I = \varphi_{UR}$$

3.2.2 Измерить значения напряжений и начальных фаз (комплексные напряжения) на элементах последовательного соединения катушки индуктивности L и резистора R1. Схема измерения модуля и фазы напряжения  $\dot{U}_L$  представлена на рис.3.2.

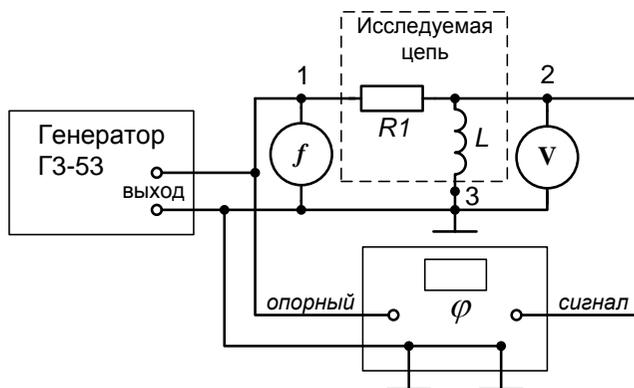


Рисунок 3.2

Сборка измерительной установки:

- Соединить нулевые провода генератора ГЗ-53, фазометра, вольтметра и мультиметра с шиной  $\perp$  панели.
- Выход генератора подключить к сигнальной шине панели (красные клеммы). К этой же шине подключить оба входа фазометра («опорный» и «сигнал»), вход мультиметра, переведенного в режим измерения частоты  $f$ , и вход вольтметра.
- На генераторе после настройки на нулевые биения, установить заданную частоту  $f$  и напряжение порядка 1–1,5 В. Убедиться, что фазометр фиксирует разность фаз, равную нулю. Измерительная установка к работе готова.

3.2.3 Измерить модуль и начальную фазу напряжения на индуктивности (рис.3.2).

- Соединить перемычкой гнездо 3 с шиной  $\perp$  (т.е. «заземлить» свободный вывод катушки индуктивности).
- Соединить перемычкой гнездо 1 этой же схемы с сигнальной шиной. Установить входное напряжение 1В.
- Отсоединить вход «сигнал» фазометра и вход вольтметра от сигнальной шины и подсоединить их к гнездам 2. Вольтметр покажет напряжение на индуктивности, фазометр – начальную фазу этого напряжения.

Измеренные значения напряжения  $U_L$  и начальной фазы  $\varphi_{UL}$  занести в таблицу 3.1.

3.2.4 Измерить модуль и начальную фазу напряжения на сопротивлении  $R_1$ . Схема измерения представлена на рис.3.3.

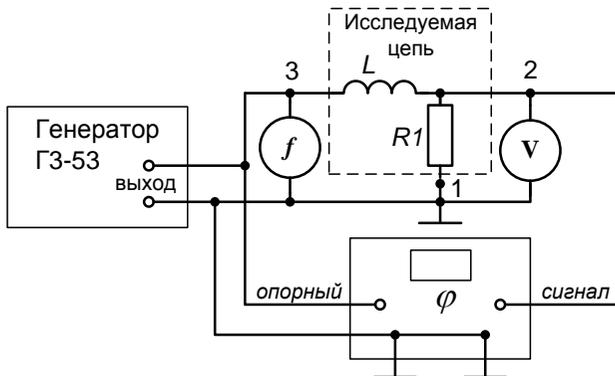


Рисунок 3.3

Для измерения комплексного напряжения на сопротивлении  $R_1$  достаточно поменять в схеме рис.3.2 места выводы 3 и 1 RL-цепочки: гнездо 1 соединить перемычкой с шиной  $\perp$ , а гнездо 3 соединить перемычкой с сигнальной шиной. Вольтметр и фазометр зафиксируют соответственно модуль и начальную фазу напряжения на сопротивлении  $R_1$ . Показания приборов

а) занести в таблицу 3.1;

б) использовать для вычисления модуля и начальной фазы тока.

Вычисленные величины для тока так же занести в таблицу 3.1.

**Замечание:** с другим способом измерения комплексного напряжения на элементах можно ознакомиться, изучив методические указания к данной работе.

3.2.5 Используя измеренные величины, вычислить индуктивность  $L$ , построить топографическую векторную диаграмму напряжений («треугольник напряжений») и изобразить вектор тока. Начало координат тока и напряжения совместить. Масштаб напряжения  $0,2В/см$ , масштаб тока  $0,2мА/см$ .

Сделать выводы о выполнении закона Кирхгофа в комплексной форме для последовательного соединения  $RL$  и закона Ома для индуктивности.

### 3.3 Исследование выполнения законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии для последовательного соединения конденсатора $C$ и резистора $R_1$ .

3.3.1 Рассчитать ток и напряжение на элементах RC-цепи. Расчетная схема, обозначения элементов и условно положительные направления напряжений и тока представлены на рис.3.1б). Начальную фазу напряжения  $\dot{U}_{\dot{A}\dot{O}}$  принять равной нулю.

Расчетные соотношения:

$$\dot{U}_C = \frac{\dot{U}_{\dot{A}\dot{O}}}{1 + j\omega RC}; \quad |\dot{U}_C| = \frac{U_{\dot{A}\dot{O}}}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}; \quad \varphi_{UC} = -\arctg \omega RC;$$

$$\dot{U}_R = \dot{U}_{\dot{A}\dot{O}} \frac{j\omega RC}{1 + j\omega RC}; \quad |U_R| = \frac{U_{\dot{A}\dot{O}} \omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}; \quad \varphi_{UR} = 90^\circ - \arctg \omega RC;$$

$$\dot{i} = \frac{\dot{U}_R}{R} = \dot{U}_{\dot{A}\dot{O}} \frac{j\omega C}{1 + j\omega RC}; \quad |\dot{i}| = U_{\dot{A}\dot{O}} \frac{\omega C}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}}; \quad \varphi_I = \varphi_{UR}.$$

Результаты расчета занести в таблицу 3.2.



3.4.2 Выполнить для RR-цепи все пункты программы измерений, проделанные для RL-цепи. Построить векторные диаграммы напряжений и тока, убедиться в выполнении закона Кирхгофа и закона Ома в комплексной форме.

### 3.5 Выводы по работе

Сделать итоговые выводы по результатам работы. В выводах четко зафиксировать фазовые сдвиги между напряжением и током на отдельных элементах:

- на сопротивлении,
- на индуктивности,
- на емкости,

подчеркнув, что именно отстает (опережает).

Сопоставив данные измерений на разных частотах в бригаде, сделать вывод о фазовом сдвиге тока относительно общего, т.е. входного напряжения в схеме RL; в схеме RC.

Сделать заключение о выполнении II закона Кирхгофа в схемах с разнотипными элементами RL, RC, (LC) и в схемах с однотипными элементами RR (LL, CC).

Обоснованно пояснить в каких из перечисленных выше схемах для экспериментальной проверки II закона Кирхгофа можно обойтись без фазометра.

## 4. Методические указания

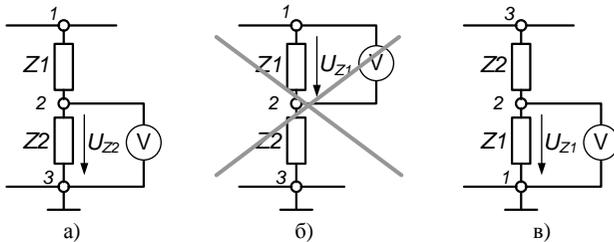


Рисунок 4.1

По причинам, которые в данной работе не обсуждаются, большинство измерительных приборов предназначены для измерения узлового напряжения (см. метод узловых напряжений). Один из выводов приборов заземлен, часто его называют **общим** проводом. Второй вывод называют **потенциальным** или **сигнальным**, или просто обозначают «вход» или «выход». При сборке измерительной установки *в первую очередь соединяются меж-*

ду собой общие провода всех приборов и исследуемого объекта. Поэтому напряжения  $U_{Z1}$  и  $U_{Z2}$  можно измерить как показано на рисунках 4.1а) и 4.1в), но невозможно как на рис.4.1б).

Для удобства измерения напряжений на элементах , каждая ветвь макета содержит пару одинаковых резисторов  $R_{1-1}$  и  $R_{1-2}$  номиналом  $1\text{кОм}$  (рис.4.2)

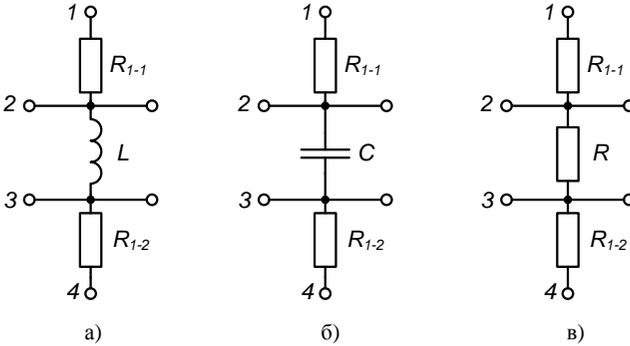


Рисунок 4.2

Особенности измерения рассмотрим на примере  $RL$ -ветви.

Если вывод 2 соединить с сигнальной шиной, а вывод 4 соединить с общим проводом, то получим схему измерения напряжения на резисторе  $R_{1-2}$ , (рис.4.3а). А если к сигнальной шине подключить вывод 1, а вывод 3 «заземлить», то получим схему измерения напряжения на индуктивности (рис.4.3б).

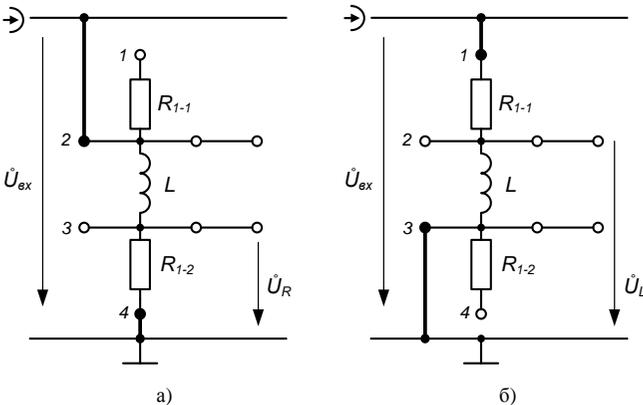


Рисунок 4.3

## 5. Контрольные вопросы

1) Назовите условия использования метода комплексных амплитуд (МКА) (тип входного воздействия, тип цепи, режим).

2) Дайте определения линейного элемента, линейной цепи, установившегося режима.

3) Назовите все параметры гармонического сигнала; укажите, как взаимосвязаны амплитудное и действующее значения, угловая и циклическая частоты.

4) Запишите выражения для  $u(t)$  и  $i(t)$ , если

*a.*  $\dot{U} = 15 \cdot e^{j80^\circ}$  В, частота  $10^3$  рад/с;

*б.*  $\dot{I} = 10 \cdot e^{-j70^\circ}$  мА, частота 3 кГц.

5) Поясните, что измеряет фазометр Ф2-1М, какой параметр измеряют цифровой и стрелочный вольтметры ВЗ-38.

6) Поясните, почему подключение вольтметра (аналогично миллиамперметра) практически не влияет на значения измеряемых величин напряжения (тока) в исследуемых двухполюсниках.

7) Поясните, как экспериментально показать, что элемент линейный.

8) Запишите в алгебраической и показательной формах комплексное сопротивление для

*a.* индуктивности;

*б.* емкости.

9) Запишите выражения и изобразите частотные зависимости  $X_L(\omega)$  и  $X_C(\omega)$ .

10) Изобразите частотные зависимости  $|Z_L|$ ,  $\varphi_{ZL}$  и  $|Z_C|$ ,  $\varphi_{ZC}$ .

11) Сформулируйте, что отражают компонентные уравнения элементов.

12) Запишите компонентные уравнения для мгновенных значений и для комплексных значений

*a.* для индуктивности;

*б.* для емкости;

*в.* для сопротивления

13) Поясните, почему  $\dot{I}_L$  всегда отстает от  $\dot{U}_L$  на  $90^\circ$ .

14) Поясните, почему  $\dot{U}_C$  всегда отстает от  $\dot{I}_C$  на  $90^\circ$ .

15) Поясните, можно ли, используя только вольтметры, продемонстрировать второй закон Кирхгофа в последовательном соединении двух элементов  $RR$ ,  $LL$ ,  $CC$ ,  $RL$ ,  $RC$ ,  $LC$ .

16) Поясните, можно ли, используя только амперметры, продемонстрировать первый закон Кирхгофа в параллельном соединении двух элементов  $RR$ ,  $LL$ ,  $CC$ ,  $RL$ ,  $RC$ ,  $LC$ .

17) Постройте лучевую и топографическую диаграммы напряжений в последовательном соединении двух заданных элементов, если известна начальная фаза тока и соотношение сопротивлений:

a.  $RC$ ,  $\varphi_I = 30^\circ$ ,  $|X_C| = 2R$ ;

б.  $RL$ ,  $\varphi_I = -45^\circ$ ,  $X_L = 0.5R$ .

18) Постройте лучевую диаграмму токов в параллельном соединении двух заданных элементов, если известна начальная фаза напряжения и соотношение сопротивлений в ветвях:

a.  $RC$ ,  $|X_C| = 0.25R$ ,  $\varphi_U = +90^\circ$ ;

б.  $RL$ ,  $X_L = 4R$ ,  $\varphi_U = 0^\circ$ .

19) По заданным векторным диаграммам (рис.5.1) определите схему и соотношение сопротивлений, дав необходимые обоснования и обозначения.

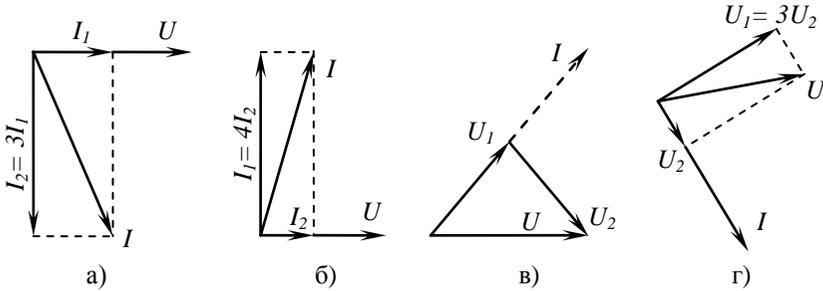


Рисунок 5.1

20) Поясните, как будет меняться векторная диаграмма на рисунке 5.1 (а, б, в или г по заданию преподавателя), если частота будет увеличиваться в 2 раза, 10 раз и  $f \rightarrow \infty$ . Во что вырождается схема при  $f \rightarrow \infty$ ?

21) Поясните, как будет меняться векторная диаграмма на рисунке 5.1 (а, б, в или г по заданию преподавателя), если частота будет уменьшаться в 2 раза, 10 раз и наконец  $f \rightarrow 0$ . Во что вырождается схема при  $f \rightarrow 0$ ?

22) Поясните, выполняется ли соответствующий закон Кирхгофа для схемы рис.5.2 при значениях  $U_1$  и  $U_2$ , приведенных в табл.5.1. Поясните, зависит ли ответ от характера  $X$  ( $X_L$  или  $X_C$ ).

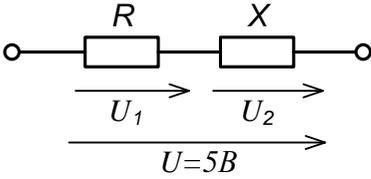


Рисунок 5.2

Таблица 5.1

Вариант	$U_1, B$	$U_2, B$
а	2	3
б	3	2
в	4	3
г	3	4

23) Поясните, выполняется ли соответствующий закон Кирхгофа для схемы рис.5.3 при значениях  $U_1$  и  $U_2$ , приведенных в табл.5.2.

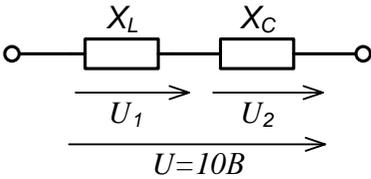


Рисунок 5.3

Таблица 5.2

Вариант	$U_1, B$	$U_2, B$
а	5	5
б	15	25
в	$10/\sqrt{2}$	$10/\sqrt{2}$
г	20	10

24) Поясните, выполняется ли соответствующий закон Кирхгофа для схемы рис.5.4 при значениях  $U_1$  и  $U_2$ , приведенных в табл.5.3.

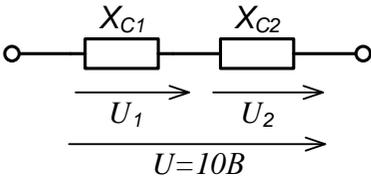


Рисунок 5.4

Таблица 5.3

Вариант	$U_1, B$	$U_2, B$
а	5	5
б	$10/\sqrt{2}$	$10/\sqrt{2}$
в	20	30

25) Поясните, выполняется ли соответствующий закон Кирхгофа, если ток общей цепи параллельно соединенных сопротивлений  $R$  и  $X$  равен 50 мА, а токи отдельных ветвей равны: а) 40мА и 30мА; б) 20мА и 30мА.

26) Поясните, может ли ток  $I$  опережать напряжение  $U$  в двухполюсниках  $RL$  (рис.5.5) при каком-либо соотношении сопротивлений  $X_L$  и  $R$ .

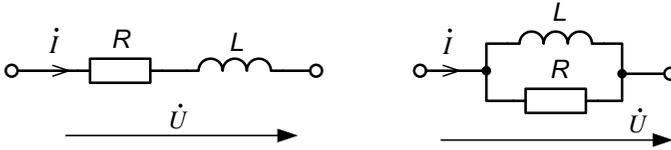


Рисунок 5.5

27) Поясните, может ли напряжение  $\dot{U}$  опережать ток  $\dot{i}$  в двухполюсниках  $RC$  (рис.5.6) при каком-либо соотношении сопротивлений  $X_C$  и  $R$ .

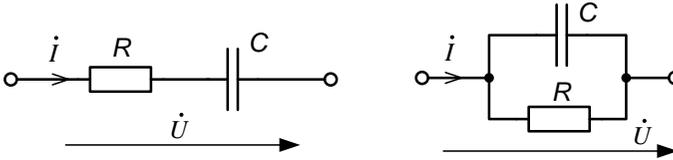


Рисунок 5.6

28) Вычислите ток  $i(t)$  в последовательном соединении двух элементов, если  $U_{вх}(t) = 20\cos(10^4t + 90^\circ)$  В;

- а.  $R = 500 \text{ Ом}$ ,  $L = 50 \text{ мГн}$ ;
- б.  $R = 40 \text{ Ом}$ ,  $C = 2.5 \text{ мкФ}$ ;
- в.  $C = 2.5 \text{ мкФ}$ ,  $L = 8 \text{ мГн}$ ;
- г.  $L = 20 \text{ мГн}$ ,  $C = 0.25 \text{ мкФ}$ ;
- д.  $R_1 = 1.5 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 500 \text{ Ом}$ .

## Список литературы

1. Попов В.П. Основы теории линейных электрических цепей. – М.: Высш.шк. 2006.-575с.
2. Атабеков Г.И. Основы теории цепей. СПб. : «Лань», 2006.-432с.