

Московский государственный технический университет  
Имени Н.Э. Баумана

**С.А. Васюков, О.И. Мисеюк**

**ИССЛЕДОВАНИЕ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ  
СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА (РЕЗОНАНС НАПРЯЖЕНИЙ)**

*Методические указания к выполнению лабораторной работы*

**Москва**  
**ИЗДАТЕЛЬСТВО**  
**МГТУ им. Н.Э. Баумана**  
**2017**

УДК 621.3

Рецензент

Васюков С.А., Мисеюк О.И.

Исследование линейных электрических цепей синусоидального тока (резонанс напряжений): методические указания к выполнению лабораторной работы по курсам «Электротехника», «Электротехника и электроника» С.А.Васюков, О.И.Мисеюк – М.: Изд – во МГТУ им. Н.Э.Баумана, 2018 – 27,[2] с.: ил.

В методических указаниях изложены основные теоретические сведения по цепям синусоидального тока, даны определения резонанса напряжений и токов. Приведены нормированные частотные характеристики последовательного колебательного контура. Представлены задание, порядок выполнения и методические указания к проведению работы, а также контрольные вопросы.

Для студентов 2 – 4 курсов МГТУ им. Н.Э.Баумана, обучающихся по программам бакалавриата и специалитета и изучающих дисциплины «Электротехника», «Электротехника и электроника» на кафедре «Электротехника и промышленная электроника»

**© Издательство МГТУ им.Н.Э.Баумана, 2018**

## ОГЛАВЛЕНИЕ

|  |    |
|--|----|
| ПРЕДИСЛОВИЕ.....   | 4  |
| 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ .....   | 5  |
| 1.1. Последовательный колебательный контур .....   | 5  |
| 1.2. Частотные характеристики последовательного колебательного контура .....   | 6  |
| 2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ .....   | 9  |
| 2.1. Изучите описание лабораторного стенда (методические указания «Стенд и приборы для исследования электрических цепей») .....                        | 9  |
| 2.2. Исследование линейной электрической цепи при последовательном соединении катушки индуктивности $L$ и конденсатора $C$ (резонанс напряжений) ..... | 9  |
| 2.2.1. Измерьте активное сопротивление катушек индуктивности .....   | 10 |
| 2.2.2. Соберите схему на наборном поле .....   | 12 |
| 2.2.3. Активация виртуальных измерительных приборов.....   | 14 |
| 2.2.4. Измерение резонансных частот при различных параметрах элементов схемы .....   | 14 |
| 2.2.5. Частотные характеристики резонансного контура .....   | 16 |
| ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ .....  | 24 |
| КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....  | 25 |
| ЛИТЕРАТУРА.....  | 26 |

## ПРЕДИСЛОВИЕ

Современное высшее техническое образование, ориентированное на формирование профессиональных компетенций, уделяет большое внимание подготовке специалистов, владеющих как теоретическими знаниями, так и современными методами исследования. Особо выделяется способность проводить исследования физических процессов и свойств объектов с выбором технических средств, методов измерений, обработки и представления результатов. А эта способность во многом формируется в результате выполнения лабораторных практикумов.

При выполнении лабораторных работ по электротехнике преследуются две основные цели. Первая цель – закрепление на практике основных положений курса. Вторая цель – научить студента навыкам работы с электроизмерительными приборами. Цепи синусоидального тока нашли широкое применение как в промышленности, так и в повседневной жизни. Их расчет, особенно с применением комплексного метода, является составной частью подготовки современного инженера. Резонансные явления в цепях синусоидального тока встречаются при проектировании фильтров, корректирующих устройств автоматики, электронных генераторов и т.п. Именно поэтому лабораторная работа по изучению цепей синусоидального тока является одной из базовых работ курса электротехники.

**Цель лабораторной работы** – изучение основных свойств, законов и режимов работы линейных электрических цепей синусоидального тока. Экспериментальное определение значений параметров элементов, входящих в исследуемую цепь, изучение их влияния на режим ее работы; экспериментальное исследование режима резонанса напряжений.

## 1. ОСНОВНЫЕ ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Резонанс представляет собой такой режим пассивной электрической цепи, содержащей индуктивности и емкости, при котором ток и напряжение цепи совпадают по фазе. При резонансе реактивное сопротивление и реактивная проводимость цепи равны нулю; соответственно равна нулю реактивная мощность на выводах цепи.

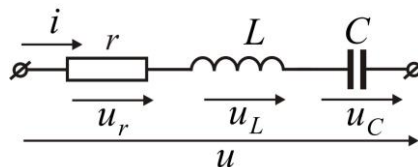
**Резонанс напряжений** наблюдается в электрической цепи с последовательным соединением участков, содержащих индуктивности и емкости. При резонансе напряжений индуктивное сопротивление одной части цепи компенсируется емкостным сопротивлением другой ее части, последовательно соединенной с первой. В результате реактивное сопротивление и реактивная мощность на выводах цепи равны нулю.

В свою очередь **резонанс токов** наблюдается в электрической цепи с параллельным соединением участков, содержащих индуктивности и емкости. При резонансе токов индуктивная проводимость одной части цепи компенсируется емкостной проводимостью другой ее части, параллельно соединенной с первой. В результате реактивная проводимость и реактивная мощность на выводах цепи равны нулю.

Частоты, при которых наблюдается явление резонанса, называются резонансными частотами.

### 1.1. Последовательный колебательный контур

**Резонанс напряжений.** Резонансная цепь с последовательным соединением  $r$ ,  $L$  и  $C$ , рис. 1, является простейшей цепью для изучения явления резонанса напряжений.



**Рис. 1.** Последовательный колебательный контур.

Комплексное сопротивление такой цепи зависит от частоты:

$$Z = r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (1)$$

Резонанс напряжений наступает при частоте  $\omega_0$  когда

$$\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} \Rightarrow \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (2)$$

Резистивное сопротивление контура при резонансе  $Z_0 = r$ .

Определим реактивные сопротивления на индуктивности и емкости при резонансе:

$$X_{L_0} = \omega_0 L = \frac{1}{\sqrt{LC}} L = \sqrt{\frac{L}{C}}, \quad X_{C_0} = \frac{1}{\omega_0 C} = \frac{\sqrt{LC}}{C} = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Видно, что сопротивления  $X_{L_0} = X_{C_0} = \sqrt{\frac{L}{C}} = \rho$  – характеристическое (волновое) сопротивление контура.

Резонансные свойства контура характеризуются добротностью  $Q$ .

Величина, обратная добротности,  $d = \frac{1}{Q}$  называется затуханием.

Добротность последовательного колебательного контура:

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{r \omega_0 C} = \frac{\rho}{r} \quad (3)$$

## 1.2. Частотные характеристики последовательного колебательного контура

Условимся называть относительной расстройкой частоты по отношению к резонансной частоте контура величину

$$\delta = \frac{\omega - \omega_0}{\omega_0} = \frac{\omega}{\omega_0} - 1. \quad (4)$$

Сопротивление контура согласно (1) и с учетом (3)

$$Z = r \left[ 1 + j \frac{\omega_0 L}{r} \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{1}{\omega \omega_0 LC} \right) \right] = r \left[ 1 + jQ \left( \frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega} \right) \right],$$

откуда, используя (4),  $\frac{\omega}{\omega_0} = \delta + 1$  или  $\frac{\omega_0}{\omega} = \frac{1}{\delta + 1}$ , получаем:

$$Z = r \left[ 1 + jQ \left( \delta + 1 - \frac{1}{\delta + 1} \right) \right] = r \left( 1 + jQ\delta \frac{\delta + 2}{\delta + 1} \right) = ze^{j\varphi}. \quad (5)$$

Следовательно, полное сопротивление и фазовый угол цепи

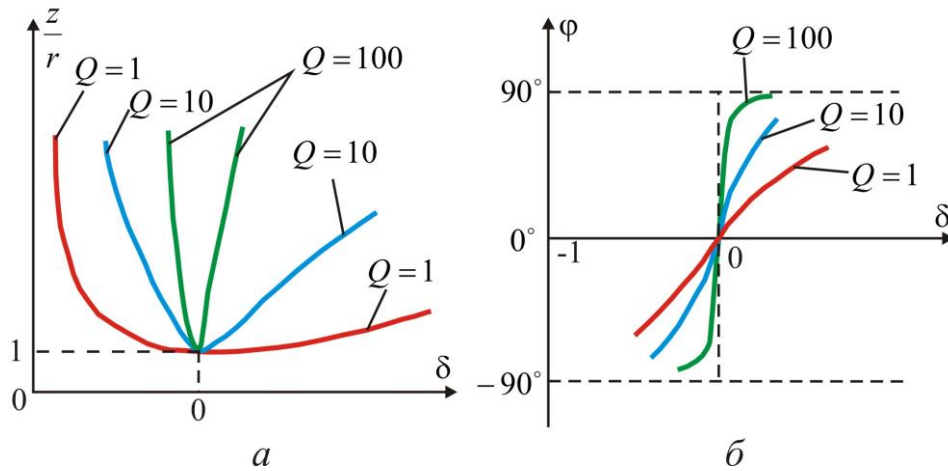
$$z = r \sqrt{1 + Q^2 \delta^2 \left( \frac{\delta + 2}{\delta + 1} \right)^2}; \quad \varphi = \arctg Q\delta \frac{\delta + 2}{\delta + 1}. \quad (6)$$

Ток в цепи

$$\dot{I} = \frac{\dot{E}}{Z} = \frac{\dot{E}}{r \left( 1 + jQ\delta \frac{\delta + 2}{\delta + 1} \right)}. \quad (7)$$

На рис. 2 приведены зависимости от частоты сопротивления и сдвига фаз между напряжением и током. Кривые даны в относительных значениях: по оси абсцисс

отложена относительная расстройка частоты  $\delta$ , а по оси ординат – отношение полного сопротивления  $z$  к активному сопротивлению  $r$ , рис. 2 а, и угол  $\varphi$ , рис. 2 б.

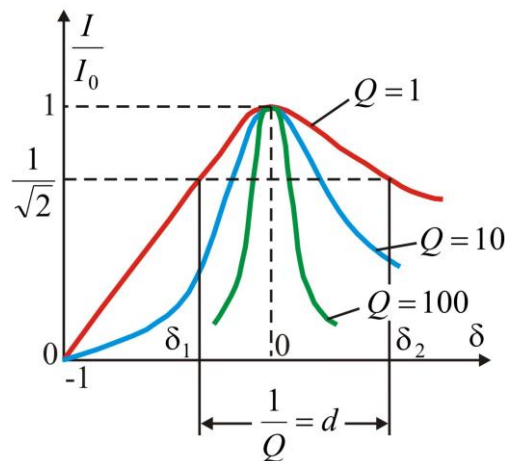


**Рис. 2.** Частотные зависимости сопротивления (а) и угла (б).

Полное сопротивление цепи минимально при резонансе напряжений; при этом ток в цепи достигает своего максимального значения  $I_0$ .

На рис. 3 изображены резонансные кривые тока в относительных значениях: по оси абсцисс, как и на предыдущих графиках, отложены значения  $\delta$ , по оси ординат – отношения токов к максимальному току при резонансе:

$$\frac{I}{I_0} = \frac{E}{z} : \frac{E}{r} = \frac{r}{z} = \frac{1}{\sqrt{1 + Q^2 \delta^2 \left( \frac{\delta + 2}{\delta + 1} \right)^2}}. \quad (8)$$



**Рис. 3.** Резонансные кривые тока в относительных единицах.

Чем выше добротность цепи  $Q$ , тем острее резонансные кривые. Таким образом, величина  $Q$  характеризует остроту резонансной кривой («остроту настройки»).

Полосу частот вблизи резонанса, на границах которой ток снижается до  $1/\sqrt{2} = 0,707$  максимального (резонансного) значения  $I_0$ , принято называть полосой пропускания резонансного контура. При токе  $I = I_0/\sqrt{2}$  мощность, расходуемая в сопротивлении  $r$ , равна:

$$r\left(\frac{I_0}{\sqrt{2}}\right)^2 = \frac{1}{2}rI_0^2,$$

т.е. составляет половину мощности, расходуемой при резонансе. Поэтому полосу пропускания характеризуют как полосу, границы которой соответствуют половине максимальной мощности. На границах полосы пропускания резонансного контура активное и реактивное сопротивления равны  $r = |x|$ . Фазовый сдвиг между напряжением на выводах цепи и током составляет  $45^\circ$ ; на нижней границе комплексное сопротивление цепи имеет емкостный характер (ток опережает напряжение) и  $\varphi = -45^\circ$ ; на верхней границе комплексное сопротивление цепи имеет индуктивный характер (ток отстает от напряжения) и  $\varphi = 45^\circ$ .

На основании (8) условие для границы полосы пропускания записывается в следующем виде:

$$\sqrt{1+Q^2\delta^2\left(\frac{\delta+2}{\delta+1}\right)^2} = \sqrt{2} \Rightarrow Q\delta\frac{\delta+2}{\delta+1} = \mp 1 \Rightarrow \delta_{1,2} = -1 \mp \frac{1}{2Q} + \sqrt{1+\frac{1}{4Q^2}} \quad (9)$$

(знак минус перед корнем, получающийся в результате решения квадратного уравнения, опускается, как не имеющий смысла). Индексы 1 и 2 и соответственно знаки минус и плюс в выражении (9) относятся к границам ниже и выше резонанса.

По определению полоса пропускания  $\Delta\omega$  резонансного контура находится из условия

$$\delta_2 - \delta_1 = \frac{1}{Q} \Rightarrow \frac{\omega_2 - \omega_1}{\omega_0} = \frac{1}{Q} = d \Rightarrow \Delta\omega = \omega_2 - \omega_1 = \frac{\omega_0}{Q}. \quad (10)$$

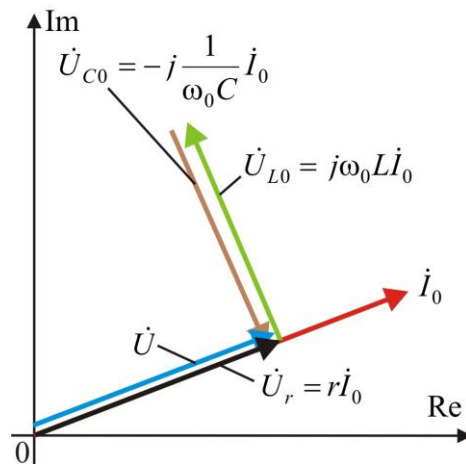
В условиях, близких к резонансу, напряжения на индуктивности и емкости могут быть весьма велики, что необходимо учитывать во избежание повреждения изоляции.

На рис. 4 показана векторная диаграмма тока и напряжений при резонансе. Напряжения на реактивных элементах при резонансе определяются из выражения

$$\dot{U}_{L0} = -\dot{U}_{C0} = \frac{\dot{U}}{r} j\omega_0 L = j\dot{U}Q. \quad (11)$$

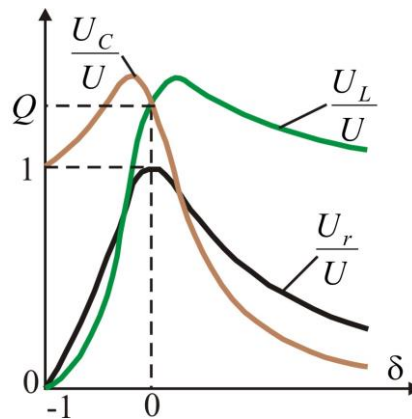


Последняя формула показывает, что добротность рассматриваемой цепи определяется как кратность перенапряжения на  $L$  и  $C$  при резонансной частоте.



**Рис. 4.** Векторная диаграмма при резонансе напряжений.

При  $Q > 1$  эти напряжения превышают напряжение  $U$ , приложенное к резонансному контуру. Однако значения, получаемые на основании (11), не являются максимальными: максимум напряжения  $U_L$  располагается несколько выше (правее), а максимум  $U_C$  - ниже (левее) резонансной частоты, рис. 5.



**Рис. 5.** Частотные зависимости напряжений на индуктивности и емкости в относительных единицах.

## 2. ЗАДАНИЯ И ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

**2.1. Изучите описание лабораторного стенда (методические указания «Стенд и приборы для исследования электрических цепей»)**

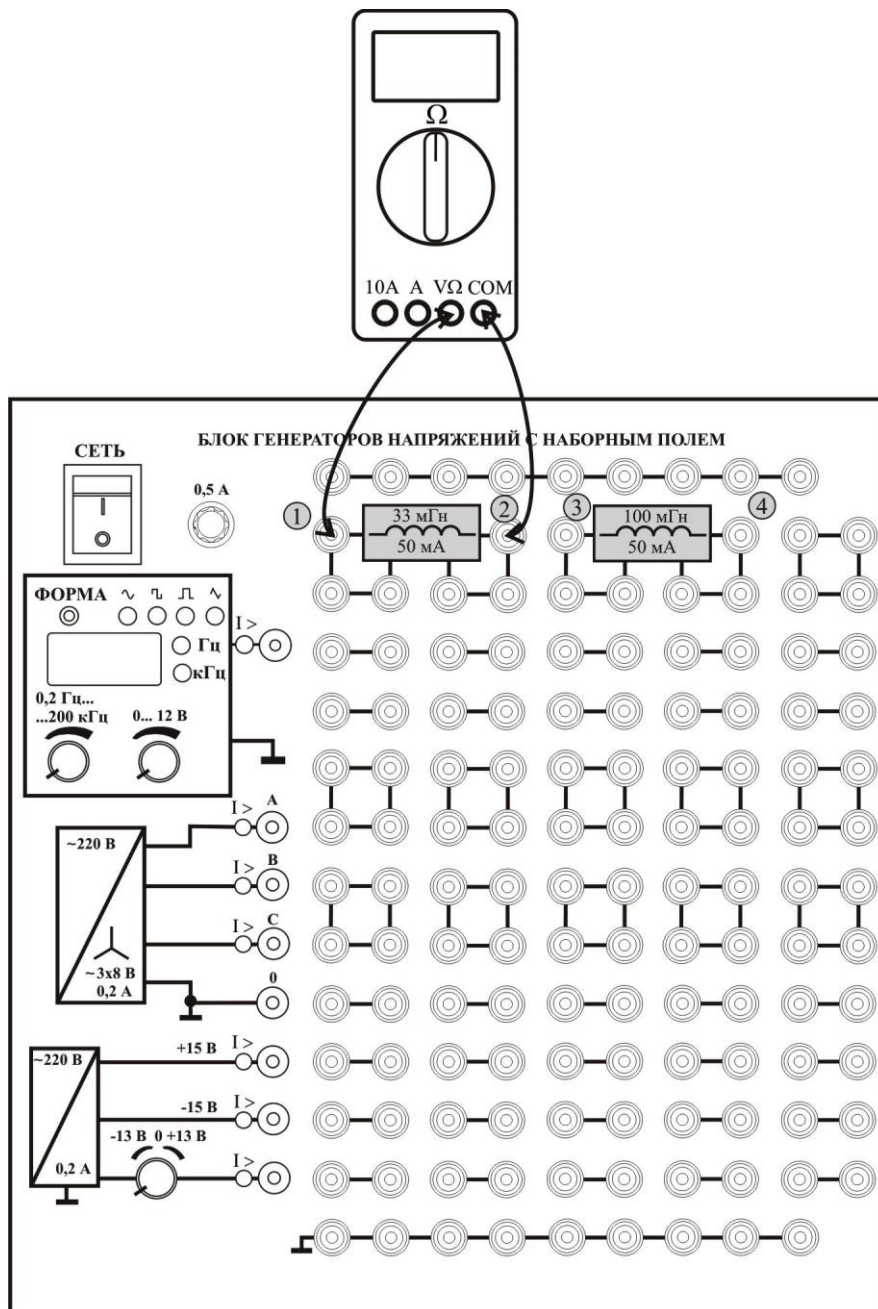
**2.2. Исследование линейной электрической цепи при последовательном соединении катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$  (резонанс напряжений)**

В лабораторной работе используются следующие мини блоки:

- катушка индуктивности 33 мГн (номинальный ток 50 мА);
- катушка индуктивности 100 мГн (номинальный ток 50 мА);
- конденсатор 0,47 мкФ (номинальное напряжение 63 В);
- конденсатор 1,0 мкФ (номинальное напряжение 63 В);
- резисторы 100 Ом, 220 Ом, 330 Ом (номинальная мощность 2 Вт).

### **2.2.1. Измерьте активное сопротивление катушек индуктивности**

Для проведения измерений включите общее питание стенда и компьютера, тумблер питания однофазного источника и питание блока мультиметров. Выберите любой из четырех мультиметров. Подсоедините к выбранному мультиметру измерительные провода (красный ко входу  $V\Omega$ , черный – ко входу COM). Установите переключатель мультиметра в положение  $\Omega$  (предел измерения 200). Смонтируйте мини блоки 33 мГн и 100 мГн на наборном поле в соответствии с рис. 6.



**Рис. 6.** Измерение активного сопротивления катушек индуктивности.

Подсоедините измерительные провода в любой полярности к точкам ① и ②, измеренное значение активного сопротивления катушки индуктивности занесите в графу  $R_{K1}$  таблицы 1. Проведите те же измерения с мини блоком 100 мГн (точки ③ и ④) и занесите результат в графу  $R_{K2}$  таблицы 1.

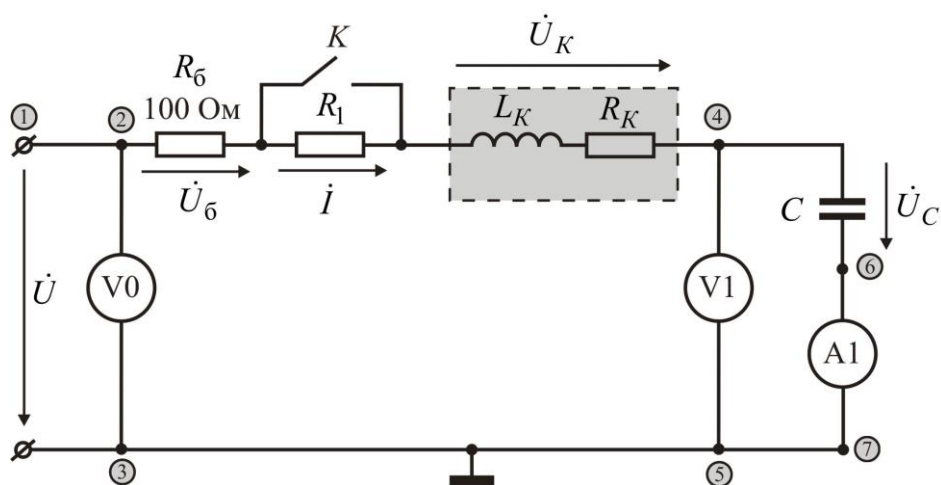
Таблица 1

|           |                      |                     |
|-----------|----------------------|---------------------|
| Мини блок | $L_{K1}, \text{мГн}$ | $R_{K1}, \text{Ом}$ |
| 33 мГн    | 33                   |                     |
| Мини блок | $L_{K2}, \text{мГн}$ | $R_{K2}, \text{Ом}$ |
| 100 мГн   | 100                  |                     |

**Примечание:** сопротивление  $R_{K1}$  должно быть около 60 Ом, а  $R_{K2}$  - около 190 Ом.

### 2.2.2. Соберите схему на наборном поле

Электрическая схема цепи приведена на рис. 7.



**Рис. 7.** Электрическая схема.

Она содержит генератор синусоидального напряжения  $\dot{U}$  (точка ①), балластный резистор  $R_6$  (он необходим для устойчивой работы виртуальных приборов), резистор  $R_1$ , мини блок катушки индуктивности  $L_K, R_K$  и конденсатор  $C$ . Мини блоки выбираются по номеру стенда, таблица 2.

Таблица 2

| № стенда | $R_1, \text{Ом}$ | $L_K, \text{мГн}$ | $C, \text{мкФ}$ |
|----------|------------------|-------------------|-----------------|
| 1 или 11 | 220              | 33                | 0,47            |
| 2 или 12 | 330              | 33                | 0,47            |
| 3 или 13 | 220              | 33                | 1,0             |
| 4 или 14 | 330              | 33                | 1,0             |
| 5 или 15 | 220              | 100               | 0,47            |

|           |     |     |      |
|-----------|-----|-----|------|
| 6 или 16  | 330 | 100 | 0,47 |
| 7 или 17  | 220 | 100 | 1,0  |
| 8 или 18  | 330 | 100 | 1,0  |
| 9 или 19  | 220 | 33  | 0,47 |
| 10 или 20 | 330 | 100 | 0,47 |

В схему включен виртуальный вольтметр  $V_0$ , измеряющий выходное напряжение генератора, виртуальный вольтметр  $V_1$ , измеряющий напряжение на конденсаторе и виртуальный амперметр  $A_1$ , измеряющий ток в цепи. Параллельно резистору  $R_1$  включен ключ  $K$ , при замкнутом ключе резистор  $R_1$  исключается из схемы.

Для монтажа исследуемой схемы на наборном поле, рекомендуется на первом этапе смонтировать только мини блоки, а затем подключить генератор и измерительные приборы, рис. 8.

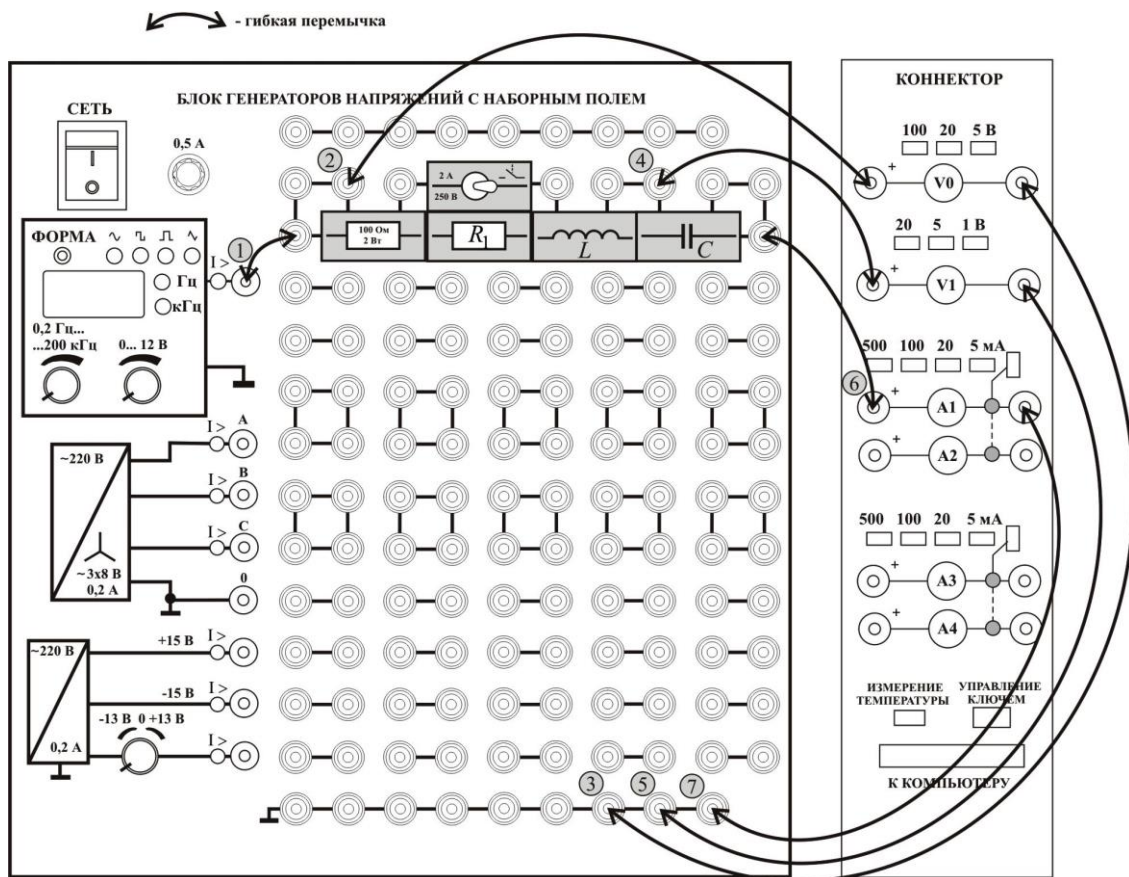


Рис. 8. Монтажная схема.

Клеммы + (красного цвета) вольтметров V0, V1 и амперметра A1 подключены к точкам ②, ④ и ⑥ соответственно. Клеммы – (синего цвета) вольтметров V0, V1 и амперметра A1 подключены к любым вводам земляной шины.

### 2.2.3. Активация виртуальных измерительных приборов

Активируйте левой кнопкой мыши иконку «ВП ТОЭ» на рабочем столе компьютера. В открывшейся вкладке **Приборы I**, рис. 9 а, установите приборы V0, V1, A1 для измерения действующего значения. Нажмите указателем мыши на вкладку Меню, и в раскрывшемся списке, рис. 9 б, последовательно активируйте **Приборы II**, **Осциллограф** и **Аналоговый прибор**, рис. 10.

Измените вкладку **Активное сопротивление R (Приборы II)** на **Угол сдвига фаз**. Измените номер входа **Аналогового прибора** с 1 на 7. Виртуальные приборы готовы для измерения напряжений, тока и угла сдвига фаз между входным напряжением и током.

### 2.2.4. Измерение резонансных частот при различных параметрах элементов схемы

Установите мини блоки схемы и положение ключа  $K$  в соответствии со строкой 1 таблицы 3.

#### Пояснения по заполнению таблицы 3.

В графу **Конфигурация цепи** внесите значение  $R_1$  в соответствии с номером стенда (таблица 2).

В столбец  $R_K$  внесите значения сопротивления мини блоков индуктивностей 33 и 100 мГн, измеренные ранее (таблица 1).

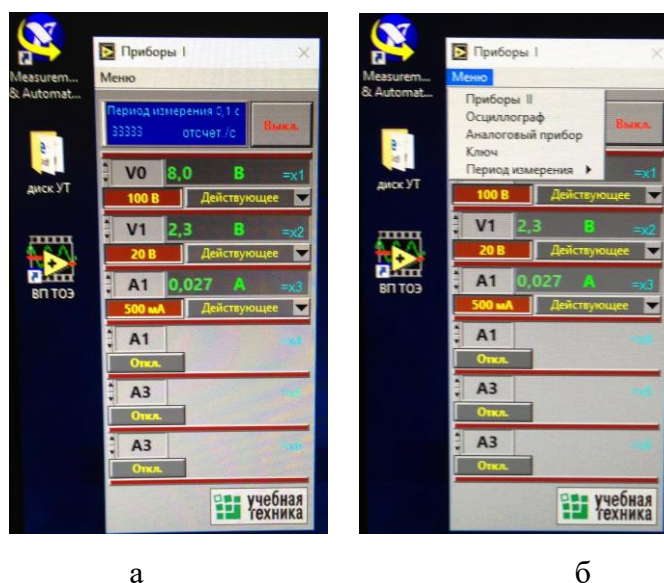


Рис. 9. Активация виртуальных приборов.



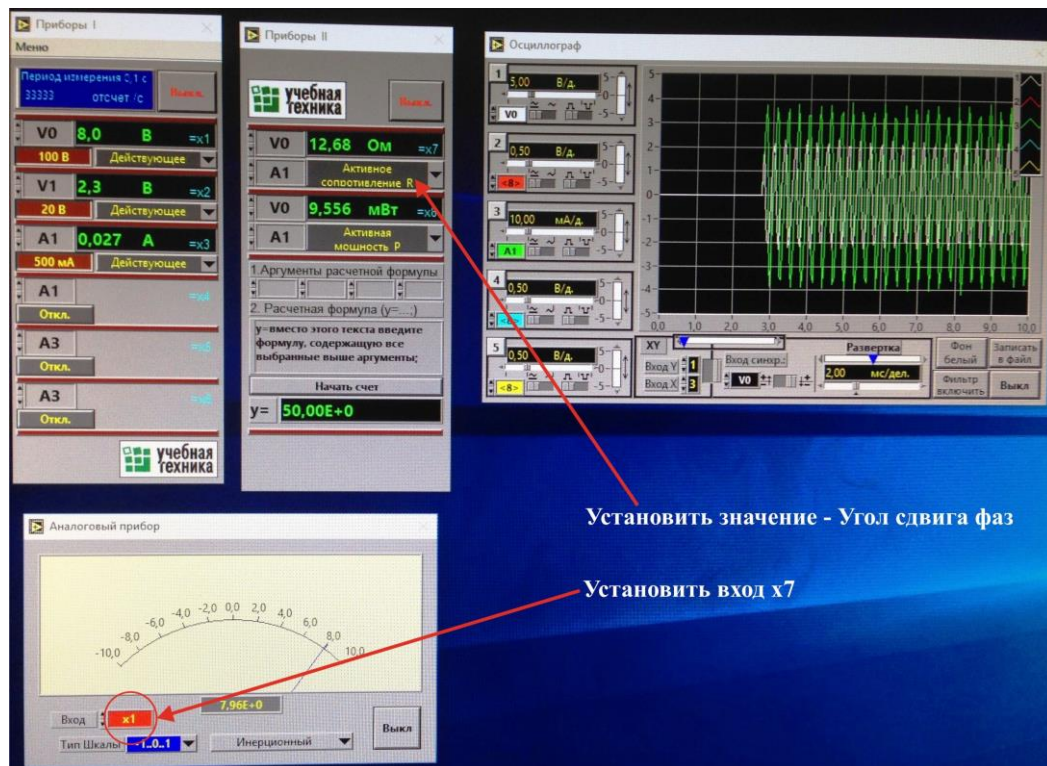


Рис. 10. Набор виртуальных приборов.

Значение 0 в графе  $R_1$  соответствует замкнутому положению ключа  $K$  (смотри обозначения на рис. 7). Значение  $R_1$  - разомкнутому положению ключа.

При заполнении столбцов **Вычислено (теоретически)** для каждой строки использовать расчетные соотношения:

- общее активное сопротивление цепи  $R = 100 + R_1 + R_K$ ;

- резонансная частота  $f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_K C}}$ , где значения  $L_K$  брать в Генри, а  $C$  – в

Фарадах;

- емкостное сопротивление рассчитывать по выражению  $x_C = \frac{1}{\omega_0 C}$ ,

где  $\omega_0 = 2\pi f_0$ ;

- ток при резонансе  $I_0$  вычислить как  $I_0 = \frac{V_0}{R} = \frac{8}{R}$ ;

- добротность  $Q$  вычислить как  $Q = \frac{x_C}{R}$ .

Кнопкой Форма (рис. 8), установить синусоидальную форму сигнала генератора. Вращая ручку регулировки амплитуды, установить напряжение генератора  $V_0 = 8\text{ В}$  и

занести в столбец  $V_0$ . Напряжение контролировать по виртуальному вольтметру  $V_0$ . При проведении измерений поддерживать это напряжение неизменным.

Изменяя частоту генератора, добиться резонанса. Резонанс достигается при минимальном сдвиге фаз (показания виртуального фазометра) и максимальном токе (показания виртуального амперметра  $A_1$ ). Используя показания приборов, заполнить строку 1 таблицы 3.

Заменяя мини блоки цепи, как указано в строках 2 – 8, провести измерения для каждой строки.

По результатам измерений для каждой строки вычислить емкостное сопротивление  $x_C = \frac{V_1}{A_1}$  и добротность  $Q = \frac{V_1}{V_0}$ .

Сделать выводы о влиянии параметров схемы на резонансную частоту, резонансный ток и добротность. При расхождении теоретических расчетов и экспериментальных данных, необходимо объяснить возникшее расхождение.

### 2.2.5. Частотные характеристики резонансного контура

2.2.5.1. Переведите ключ  $K$  в замкнутое положение ( $R_1 = 0$ ).

2.2.5.2. Установите мини блоки схемы (рис. 8) в соответствии с номером Вашего стенда (таблица 2).

2.2.5.3. Заполните первую строку таблицы 4 (кроме значений  $\Delta_1$ ,  $\Delta_2$ ,  $\Delta f$ ).

2.2.5.4. Изменяя частоту генератора, добиться резонанса (по минимальному абсолютному значению угла сдвига фаз). Занести в таблицу 4 резонансную частоту  $f_0$ , резонансный ток  $I_0$ , угол сдвига фаз  $\varphi$  и напряжение на конденсаторе  $V_1$ .

2.2.5.5. Изменяя частоту в меньшую сторону, добейтесь уменьшения тока до уровня  $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$ . Запишите полученную частоту  $f_1$ , ток, угол сдвига фаз и напряжение на конденсаторе в столбец  $f_1$ .

2.2.5.6. Изменяя частоту в большую от  $f_0$  сторону, добейтесь значение тока  $\frac{I_0}{\sqrt{2}}$ . Запишите полученную частоту  $f_2$ , ток, угол и напряжение на конденсаторе в столбец  $f_2$ .

2.2.5.7. Вычислите шаг  $\Delta_1$  изменения частоты для частот меньших резонансной частоты  $f_0$ , и шаг  $\Delta_2$  для частот больших резонансной частоты. Занесите вычисленные значения в первую строку таблицы 4.



2.2.5.8. Проведите необходимые измерения для остальных частот.

2.2.5.9. Вычислите для всех частот отношение текущего тока к резонансному  $I/I_0$ , полное сопротивление  $z = 8/I$ , отношение полного сопротивления к сопротивлению на резонансе  $z/z_0$  и занесите полученные значения в таблицу 4.

2.2.5.10. Вычислите ширину полосы пропускания  $\Delta f = f_2 - f_1$  и занесите результат в таблицу 4.

2.2.5.11. Разомкните ключ  $K$  и сделайте измерения по пунктам 2.2.5.3 – 2.2.5.10, заноса результаты в таблицу 5.

2.2.5.12. Постройте графики  $\frac{I}{I_0}$ ,  $\frac{z}{z_0}$  и  $\varphi$  в функции частоты по данным таблиц 4 и 5 в единой системе координат, рис. 11.

2.2.5.13. Постройте, рис. 12, векторную диаграмму напряжений для частот  $f_0$ ,  $f_1$ ,  $f_2$  по данным таблицы 4. Векторная диаграмма должна отображать взаимное расположение входного напряжения  $\dot{U}$ , напряжения на балластном резисторе  $\dot{U}_6$ , напряжения на конденсаторе  $\dot{U}_C$  и напряжения на катушке индуктивности  $\dot{U}_K$ . Вектор тока  $\dot{I}$  на рис. 11 построен без соблюдения масштаба и ориентирован горизонтально вправо. При построении используйте масштабную линейку (рис. 12).

Для облегчения построений, по данным таблицы 4 заполните таблицу 6 и вычислите напряжение на балластном резисторе.

Таблица 6

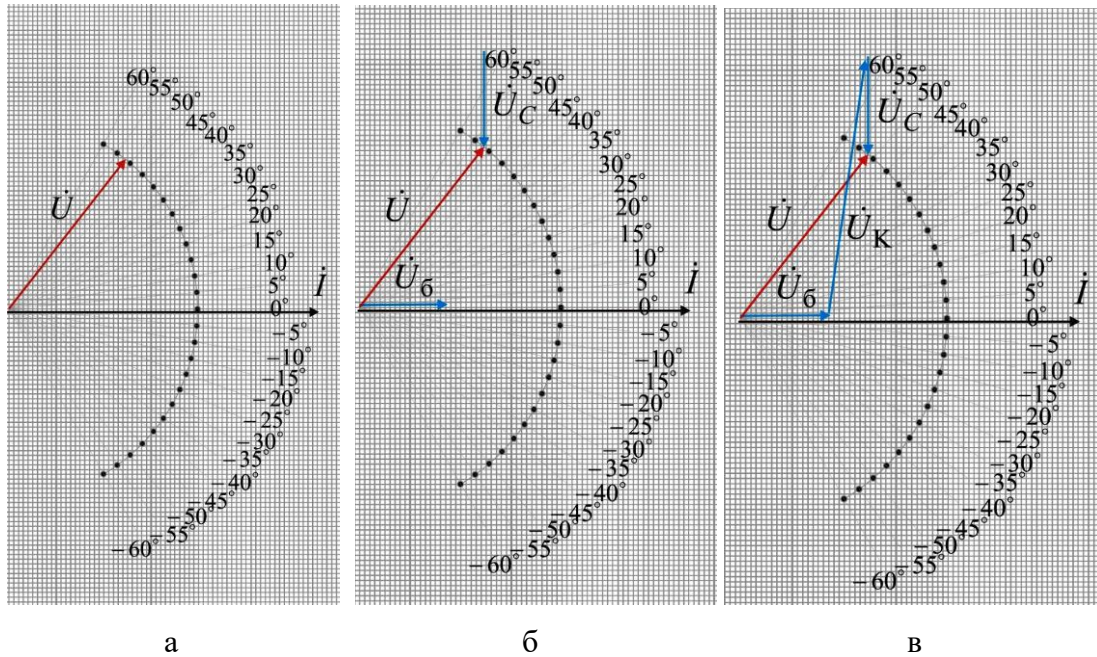
| $f$                    | $f_0$ | $f_1$ | $f_2$ |
|------------------------|-------|-------|-------|
| $I, A$                 |       |       |       |
| $U, B$                 | 8     | 8     | 8     |
| $U_C, B$               |       |       |       |
| $U_6 = I \cdot 100, B$ |       |       |       |
| $\varphi, \text{град}$ |       |       |       |

Пример построения векторной диаграммы показан на рис. 13:

- отложите под углом  $\varphi$  вектор входного напряжения  $\dot{U}$  (рис. 13 а);

- отложите вектор  $\dot{U}_6$  по направлению тока  $\dot{I}$ , а вектор  $\dot{U}_C$  отстающим от тока на  $90^\circ$ , причем таким образом, чтобы концы (стрелки) векторов  $\dot{U}$  и  $\dot{U}_C$  сходились в одной точке (рис. 13 б);

- дополните систему векторов вектором  $\dot{U}_K$  так, чтобы выполнялось уравнение  $\dot{U} = \dot{U}_6 + \dot{U}_K + \dot{U}_C$  (рис. 13 в).



**Рис. 13.** Порядок построения векторной диаграммы.

После выполнения всех расчетов результаты показать преподавателю и, получив его разрешение, выключить питание стенда.

### Таблица 3

[illegible]

Таблица 4

| Вариант №      Конфигурация цепи (ключ $K$ замкнут): $R_1 = 0 \text{ Ом}$ $L_K =$ мГн $R_K =$ Ом $C =$ мкФ<br>$R = R_K + 100 =$ Ом<br>$\Delta_1 = (f_0 - f_1)/3 =$ Гц $\Delta_2 = (f_2 - f_0)/3 =$ Гц $\Delta f =$ Гц |                   |                  |                          |                   |                  |         |                  |                   |                          |                  |                   |
|---|-------------------|------------------|--------------------------|-------------------|------------------|---------|------------------|-------------------|--------------------------|------------------|-------------------|
| $f, \text{Гц}$  | $f_1 - 2\Delta_1$ | $f_1 - \Delta_1$ | $f_1$                    | $f_0 - 2\Delta_1$ | $f_0 - \Delta_1$ | $f_0$   | $f_0 + \Delta_2$ | $f_0 + 2\Delta_2$ | $f_2$                    | $f_2 + \Delta_2$ | $f_2 + 2\Delta_2$ |
|   |                   |                  |                          |                   |                  |         |                  |                   |                          |                  |                   |
| $I, \text{А}$   |                   |                  | $\frac{I_0}{\sqrt{2}} =$ |                   |                  | $I_0 =$ |                  |                   | $\frac{I_0}{\sqrt{2}} =$ |                  |                   |
| $\frac{I}{I_0}$   |                   |                  |                          |                   |                  | 1       |                  |                   |                          |                  |                   |
| $\varphi, \text{град}$  |                   |                  |                          |                   |                  |         |                  |                   |                          |                  |                   |
| $z, \text{Ом}$  |                   |                  |                          |                   |                  | $z_0 =$ |                  |                   |                          |                  |                   |
| $\frac{z}{z_0}$   |                   |                  |                          |                   |                  | 1       |                  |                   |                          |                  |                   |
| $V_1, \text{В}$   |                   |                  |                          |                   |                  |         |                  |                   |                          |                  |                   |

Таблица 5

| Вариант №               |                   | Конфигурация цепи (ключ $K$ разомкнут): $R_1 =$ |                          |                              |                  |         | Ом                           | $L_K =$           | мГн                      | $R_K =$          | Ом                | $C =$ | мкФ |
|-------------------------|-------------------|---|--------------------------|------------------------------|------------------|---------|------------------------------|-------------------|--------------------------|------------------|-------------------|-------|-----|
| $R = R_1 + R_K + 100 =$ |                   | Ом  |                          | $\Delta_1 = (f_0 - f_1)/3 =$ |                  | Гц      | $\Delta_2 = (f_2 - f_0)/3 =$ |                   | Гц                       | $\Delta f =$     |                   | Гц    |     |
| $f, \text{Гц}$          | $f_1 - 2\Delta_1$ | $f_1 - \Delta_1$                                | $f_1$                    | $f_0 - 2\Delta_1$            | $f_0 - \Delta_1$ | $f_0$   | $f_0 + \Delta_2$             | $f_0 + 2\Delta_2$ | $f_2$                    | $f_2 + \Delta_2$ | $f_2 + 2\Delta_2$ |       |     |
|                         |                   |   |                          |                              |                  |         |                              |                   |                          |                  |                   |       |     |
| $I, \text{А}$           |                   |   | $\frac{I_0}{\sqrt{2}} =$ |                              |                  | $I_0 =$ |                              |                   | $\frac{I_0}{\sqrt{2}} =$ |                  |                   |       |     |
| $\frac{I}{I_0}$         |                   |   |                          |                              |                  | 1       |                              |                   |                          |                  |                   |       |     |
| $\varphi, \text{град}$  |                   |   |                          |                              |                  |         |                              |                   |                          |                  |                   |       |     |
| $z, \text{Ом}$          |                   |   |                          |                              |                  | $z_0 =$ |                              |                   |                          |                  |                   |       |     |
| $\frac{z}{z_0}$         |                   |   |                          |                              |                  | 1       |                              |                   |                          |                  |                   |       |     |
| $V_1, \text{В}$         |                   |   |                          |                              |                  |         |                              |                   |                          |                  |                   |       |     |



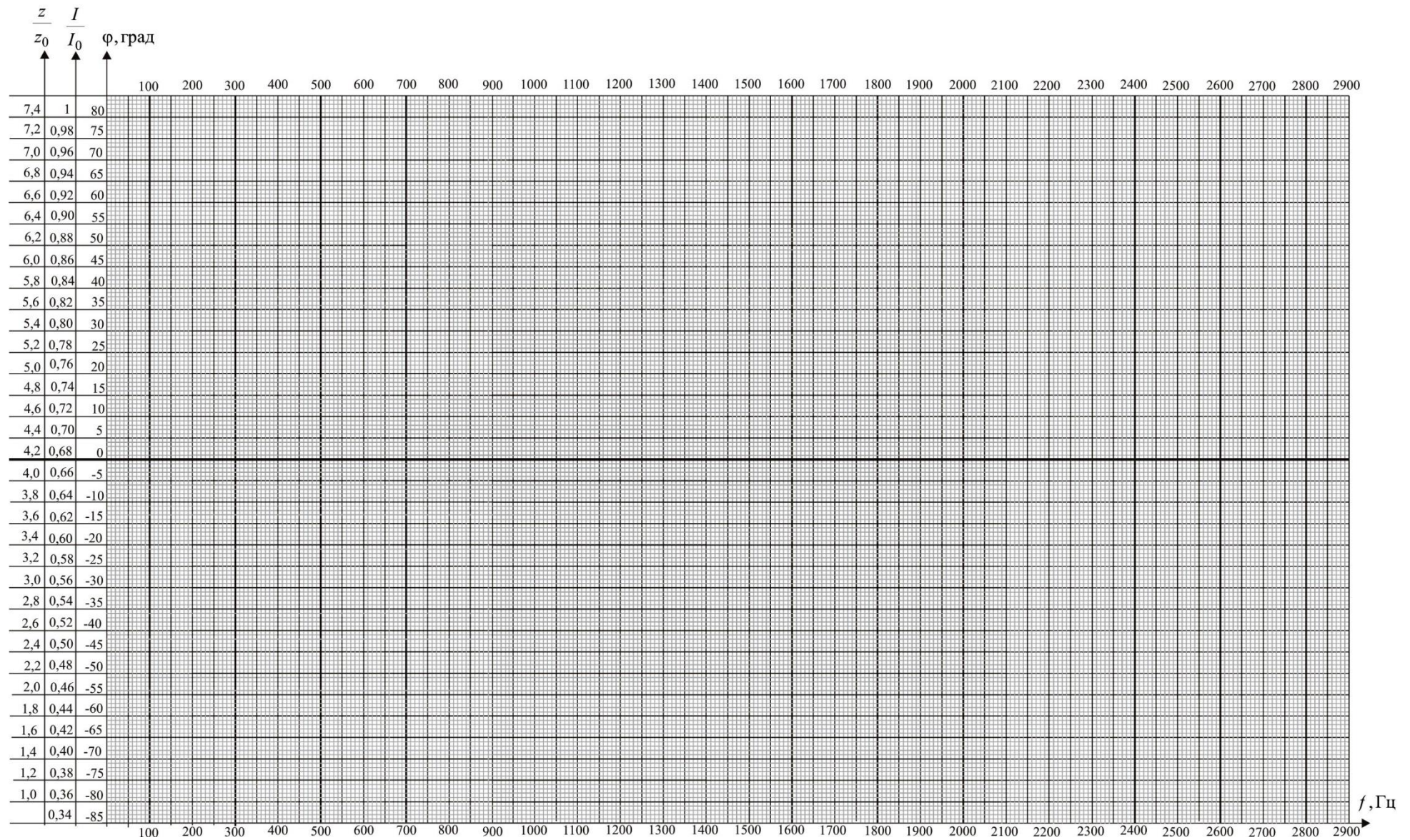


Рис. 11. Частотные характеристики последовательного резонансного контура.



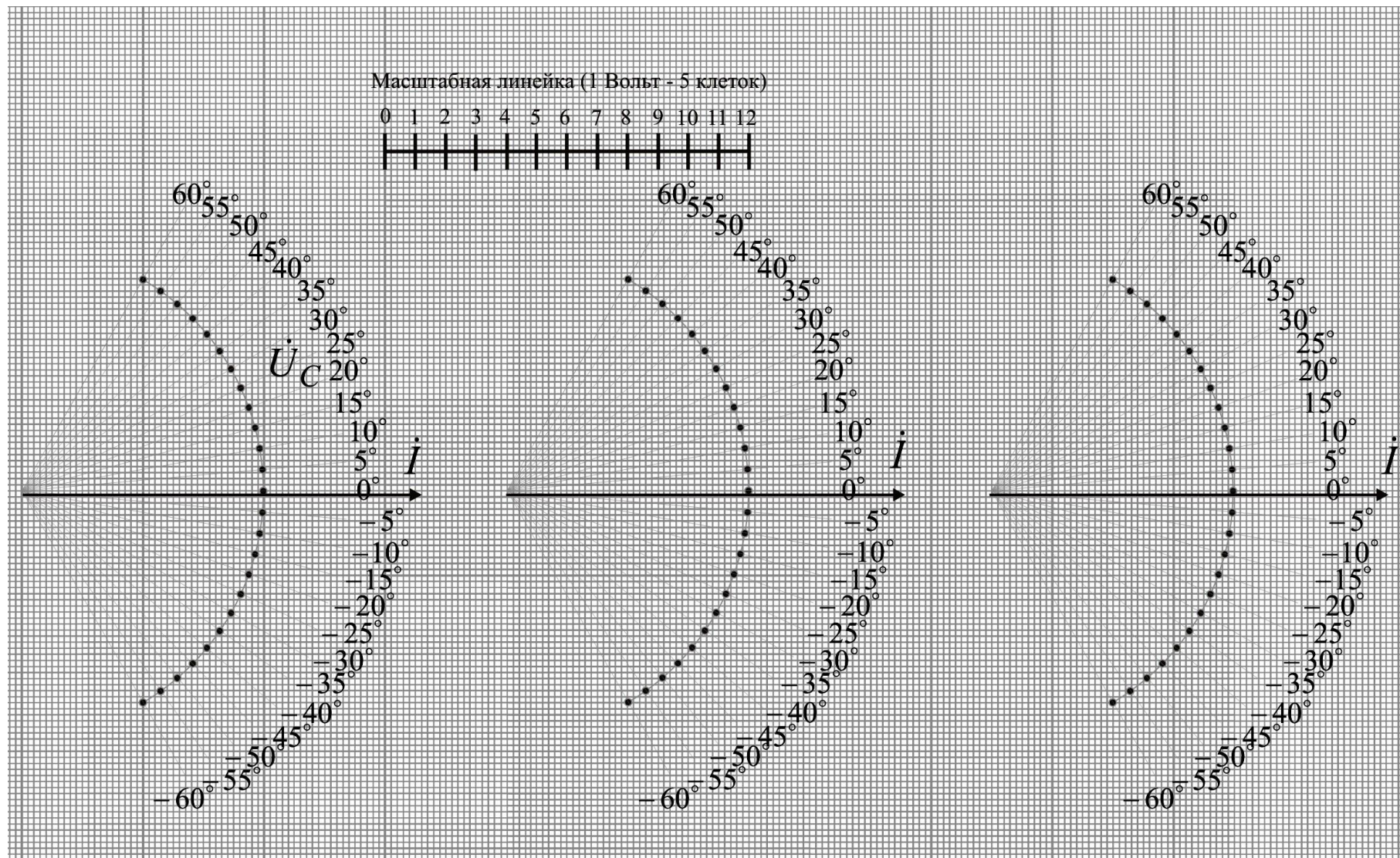


Рис. 12. Векторные диаграммы.

### **ТРЕБОВАНИЯ К ОТЧЕТУ**

Форма отчета или предоставляется студентам в электронном виде лектором потока, или копируется и распечатывается с сайта кафедры <http://fn.bmstu.ru/learning-work-fs-7/laboratory-works-fs-7>.



### КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Почему в последовательной  $R-L-C$  цепи изменение емкости конденсатора приводит к изменению значения тока  $I$ , коэффициента мощности  $\cos \varphi$ , активной  $P$  и полной  $S$  мощностей?
2. Как добиться резонанса при последовательном соединении сопротивлений  $R-L-C$  элементов, и по каким признакам убедиться, что в цепи наступил резонанс?
3. В последовательной  $R-L-C$  цепи установлен режим резонанса напряжений. Сохранится ли резонанс, если:
  - а) параллельно конденсатору подключить активное сопротивление;
  - б) параллельно катушке индуктивности подключить активное сопротивление;
  - в) последовательно включить активное сопротивление?
4. В последовательной  $R-L-C$  установлен режим резонанса напряжений. Как изменится активная мощность, если:
  - а) последовательно включить активное сопротивление, конденсатор;
  - б) параллельно зажимам источника подключить активное сопротивление, конденсатор?
5. Как примерно изменятся графики, рис. 11, если уменьшить сопротивление  $R_K$ ?
6. Объясните, как качественно изменится векторная диаграмма напряжений, построенная при  $C_1 = C_{рез}$ , если увеличить частоту питающего напряжения?
7. Объясните, как качественно изменится векторная диаграмма напряжений, построенная при  $C_1 = C_{рез}$ , если увеличить емкость  $C_1$ ?
8. Что такое добротность резонансного контура? Объясните, как найти добротность по экспериментальным данным и по графикам.
9. Как изменится добротность последовательного контура (рис. 7) при замыкании ключа  $K$ ?
10. Объясните, почему при резонансе напряжений, ток принимает максимальное значение?

### ЛИТЕРАТУРА

*Атабеков Г.И.* Теоретические основы электротехники: учебник для вузов. В трех частях. Часть первая. М.: Издательство «Энергия», 1970. 592 с.

*Борисов Ю.М., Липатов Д.Н., Зорин Ю.Н.* Электротехника. СПб.: БХВ-Петербург, 2012. 551 с.

*Касаткин А.С., Немцов М.В.* Электротехника центр «Академия», 2010. 544 с.