



**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ**  
ФГАОУ ВО «Севастопольский  
государственный университет»  
Институт радиоэлектроники и информационной  
безопасности

**МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ**  
к лабораторной работе «Исследование явления  
резонанса и частотных характеристик линейных  
цепей синусоидального тока.»  
по дисциплине  
**ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ**  
для студентов дневной и заочной форм обучения  
направления 11.03.04 «Электроника и  
наноэлектроника»

**Севастополь  
2017 г.**

Методические указания к лабораторной работе «Исследование явления резонанса и частотных характеристик линейных цепей синусоидального тока» по дисциплине «основы теории цепей» для студентов дневной и заочной форм обучения направления 11.03.04 — «Электроника и наноэлектроника» / СевГУ; Сост. Д.Г. Мурзин. — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2017. — 23 с.

Целью методических указаний является оказание помощи студентам очной и заочной форм обучения в подготовке и выполнении лабораторной работе «Исследование явления резонанса и частотных характеристик линейных цепей синусоидального тока.» по дисциплине «основы теории цепей».

Методические указания написаны на основании программы дисциплины «Основы теории цепей» ОПП подготовки бакалавров 11.03.04 — «Электроника и наноэлектроника».

Рассмотрены и утверждены на заседании кафедры электронной техники (протокол № 6 от 28 января 2016 г.)

Рецензент: к.т.н., доцент кафедры электронной техники Шевченко Н.В.

Ответственный за выпуск: заведующий кафедрой электронной техники, к.т.н., доцент Михайлюк Ю.П.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	4
Требования к оформлению отчета к лабораторной работе.....	5
Лабораторная работа «Исследование явления резонанса и частотных характеристик линейных цепей синусоидального тока.» .....	6
Теоретические сведения .....	6
Порядок выполнения лабораторной работы .....	19
Контрольные вопросы.....	22
Библиографический список.....	23

## **ВВЕДЕНИЕ**

Дисциплина «Основы теории цепей» изучается студентами направления 11.03.04 — «Электроника и нанoeлектроника» дневной и заочной форм обучения во 2-ом и 3-ем семестрах.

Методические рекомендации по выполнению каждой лабораторной работы содержат следующие разделы: цель работы, теоретические сведения, предварительный расчет, порядок выполнения работы, обработку результатов измерений, оформление отчета, выводы по работе и контрольные вопросы.

В процессе выполнения работы студенты должны сохранить все результаты компьютерных экспериментов. После завершения работы преподаватель просматривает полученные результаты. На основании полученных результатов каждый студент оформляет отчет.

## **ТРЕБОВАНИЯ К ОФОРМЛЕНИЮ ОТЧЕТА К ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ**

Отчет о выполнении лабораторной работы оформляется на стандартных листах формата А1. Расположение листов – вертикальное. Поля: левое 2 см, верхнее 2 см, нижнее 1 см, правое 1 см. Отчет следует оформлять в редакторе Microsoft Word или аналоге.

Отчет должен титульный лист и содержать следующие разделы: цель работы, схему, результаты (экранные формы) моделирования, результаты обработки данных (графики, диаграммы, измеренные и рассчитанные параметры и др.) и выводы по работе.

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА

Тема: «Исследование явления резонанса и частотных характеристик линейных цепей синусоидального тока»

Цель работы – экспериментальное исследование резонансного режима, построение частотной характеристики цепи синусоидального тока.

### Теоретические сведения

*Электрическим резонансом* называется явление совпадения по фазе тока и напряжения на входе пассивного двухполюсника, содержащего индуктивности и емкости.

В режиме резонанса на входе такой цепи напряжение и ток совпадают по фазе, т.е. критерием резонанса является равенство угла сдвига фаз нулю ( $\phi = 0$ ). Учитывая, что  $\phi = \arctg \frac{X}{R}$  в

последовательной цепи,  $\phi = \arctg \frac{B}{G}$  в параллельной цепи, условиям возникновения резонансов соответствуют соотношения:  $X = 0$  либо  $B = 0$ .

В электрических цепях имеют место два вида резонансов: *резонанс напряжений* и *резонанс токов*. При резонансе напряжений при определенных параметрах цепи возможно значительное превышение напряжения на индуктивности и на конденсаторе над входным напряжением цепи. При резонансе токов в индуктивности и конденсаторе токи в некоторых случаях могут быть значительно больше входного тока цепи. Поэтому такие резонансы называют соответственно резонансом напряжения и резонансом тока. Условие возникновения первого: реактивное сопротивление  $X = 0$ , второго – реактивная проводимость  $B = 0$ .

### 1 Последовательный колебательный контур

Для последовательного колебательного контура (рис 1) при резонансе реактивное сопротивление последовательного контура

оказывается равным нулю  $X_0 = \omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0$ , а сопротивление

контура становится чисто активным, что является условием резонанса напряжений. Воспользовавшись простейшими последовательными схемами замещения индуктивной катушки и конденсатора, получим эквивалентную схему, изображённую на рис. 1, б. Эта схема может быть упрощена за счёт преобразования (рис. 1, в):  $R = R_L + R_C$ , причём суммарные потери в контуре определяются в основном потерями в катушке и мало зависят от частоты. Входное сопротивление контура относительно зажимов  $I - I'$  равно  $Z(j\omega) = R + j[\omega L - 1/(\omega C)]$ .

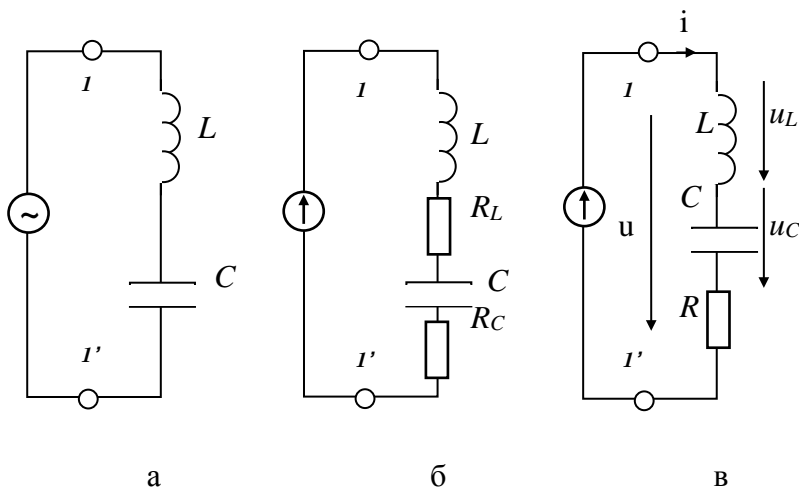


Рис. 1. - Схемы последовательного колебательного контура  
а – принципиальная, б – эквивалентная, в – упрощенная  
эквивалентная

При этом ток в контуре достигает своего максимального значения, чем и объясняется возрастание напряжений на его элементах. Частота, при которой реактивное сопротивление контура равно нулю, т. е. выполняется условие резонанса

напряжении  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ . Угловой частоте  $\omega_0$  соответствует частоте резонанса

$$f_0 = 1/2\pi\sqrt{LC}$$

и длине электромагнитной волны  $\lambda = c/f_0 = 2\pi c\sqrt{LC}$ , где  $c = 3 \cdot 10^8$  м/с – скорость света.

$T_0 = \frac{2\pi}{\omega_0}$  – период колебаний при резонансе.

Комплексное сопротивление последовательного контура:

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

Напряжение на емкости в комплексном представлении

$$\dot{U}_C = -jX_C \dot{I} = \frac{1}{j\omega C} \frac{\dot{E}_z}{Z},$$

откуда комплексная передаточная функция

$$K(j\omega) = \frac{\dot{U}_C}{\dot{E}_z} = \frac{-j(1/\omega C)}{R + jX},$$

уравнение амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) контура

$$K(\omega) = \frac{1}{\omega C \sqrt{R^2 + X^2}}, \quad (1)$$

а уравнение ФЧХ

$$\phi(\omega) = \arctg(-1/0) - \arctg(X/R) = -\pi/2 - \arctg(X/R). \quad (2)$$

При резонансе реактивные сопротивления индуктивности и

емкости контура равны между собой  $\omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}$ .

Сопротивление индуктивности или емкости контура при резонансе называется волновым или характеристическим

сопротивлением контура  $\rho = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C} = \sqrt{\frac{L}{C}}$ .

На резонансной частоте сопротивление контура носит чисто резистивный характер и имеет минимальное значение, а ток в контуре – максимальное значение  $I_0 = U/R$ .

Важнейшим параметром последовательного колебательного контура является его добротность



$$Q = \rho/R.$$

Добротность показывает во сколько раз напряжение на реактивных элементах  $L$  и  $C$  превышает входное напряжение  $U$  на резонансной частоте.

Величина  $d$ , обратная добротности, называется затуханием колебательного контура

$$d=1/Q.$$

Чем меньше активное сопротивление контура, тем выше его добротность. Добротность контура практически ограничивается активным сопротивлением индуктивной катушки.

Рассмотренные параметры колебательного контура:  $\omega_0$ ,  $f_0$ ,  $T_0$ ,  $\rho$ ,  $Q$ ,  $d$  — относятся к числу вторичных параметров. Они характеризуют основные свойства контура без учета конкретных значений  $L$ ,  $C$ ,  $R$  и позволяют сравнить различные колебательные контуры.

Параметры элементов  $L$ ,  $C$ ,  $R$  являются первичными параметрами контура. Они характеризуют данный контур как совокупность конкретных элементов и позволяют отличить его от других контуров, с такими же  $\omega_0$ ,  $\rho$ ,  $Q$ .

Зависимость действующего значения тока в контуре от частоты определяется выражением

$$I(\omega) = \frac{U}{Z} = \frac{U}{\sqrt{R^2 + (\omega L - 1/\omega C)^2}} \quad (3)$$

Зависимости  $I(\omega)$ ,  $U_R(\omega)$ ,  $U_L(\omega)$  и  $U_C(\omega)$  называются амплитудно-частотными характеристиками (АЧХ) или резонансными характеристиками. Они определяются по формулам

$$U_R(\omega) = RI(\omega); \quad U_L(\omega) = \omega LI(\omega); \quad U_C(\omega) = (1/\omega C)I(\omega) \quad (4)$$

На рис. 2,а изображены АЧХ, определяемые выражениями (4) и на рис. 2,б – ФЧХ  $\varphi(\omega)=\arctan X/R$

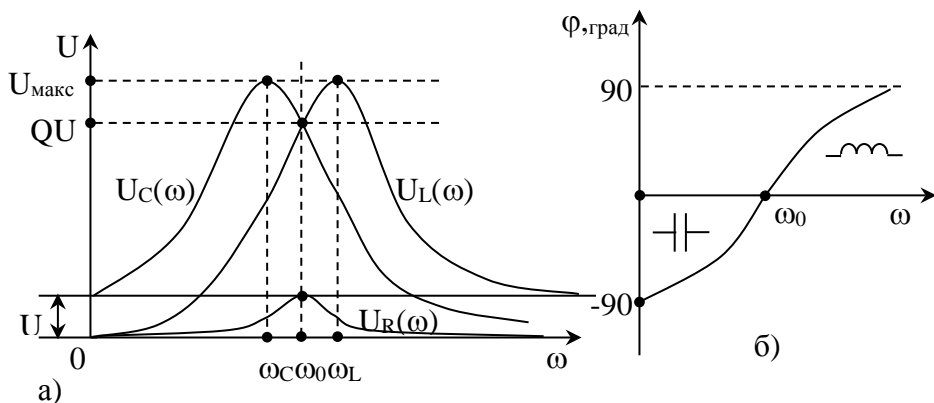


Рис. 2. - АЧХ (а) и ФЧХ (б) последовательного колебательного контура.

Анализ зависимости  $U_R(\omega)$  показывает, что напряжение на сопротивлении  $U_R(\omega)$  имеет максимальное значение на резонансной частоте  $\omega_0$  и равно входному напряжению  $U_{R0}=U$ .

Напряжения индуктивности  $U_{L0}(\omega)$  и емкости  $U_{C0}(\omega)$  при резонансе равны между собой и в  $Q$  раз больше входного напряжения (см. рис. 2,а)

$$U_{L0} = U_{C0} = \rho I_0 = U(\rho/R) = UQ. \quad (5)$$

Максимальные значения напряжений на ёмкости и индуктивности немного больше резонансного и равны между собой

$$U_{C_{max}} = U_{L_{max}} = \frac{QU}{\sqrt{1 - 1/4Q^2}} \quad (6)$$

и получаются соответственно на частотах (см. рис.2,а):

$$\omega_C = \omega_0 \sqrt{1 - 1/2Q^2}; \quad \omega_L = \omega_0 \sqrt{1 + 1/2Q^2} \quad (7)$$

С увеличением добротности  $Q$  частоты  $\omega_C$  и  $\omega_L$  приближаются к резонансной частоте ( $\omega_C \approx \omega_L \approx \omega_0$ ) и максимальные значения напряжения на ёмкости и индуктивности приближаются к их резонансному значению

$$U_{L_{max}} = U_{C_{max}} \approx QU. \quad (8)$$

Степень отклонения режима колебательного контура от резонанса принято оценивать абсолютной

$$\Delta\omega = \omega - \omega_0, \quad (9)$$

относительной

$$\delta = \Delta\omega/\omega_0 = \Delta f/f_0 \quad (10)$$

и обобщённой расстройкой

$$\xi = \frac{X}{R} = \frac{\omega L - 1/\omega C}{R} = \left(\frac{\omega_0 L}{R}\right) \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) = Q \left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right) \quad (11)$$

При небольших  $f$ , абсолютных расстройках  $\Delta f = f - f_0$  обобщённая расстройка может быть определена по приближённой формуле  $\xi \cong 2Q\Delta f/f_0$ .

Наиболее широко в теоретических исследованиях применяется обобщённая расстройка  $\xi$ , т.к. её использование существенно упрощает расчёт. Например, выражение для АЧХ тока (3) и сдвига фаз между напряжением и током можно записать через обобщённую расстройку в виде:

$$I = \frac{U}{R\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{I_0}{\sqrt{1+\xi^2}}; \quad (12)$$

$$\varphi = \arctg \xi.$$

Важной характеристикой колебательного контура является его полоса пропускания (ПП), под которой понимается область частот вблизи резонанса, где ток в контуре имеет значение не меньше  $1/\sqrt{2}$  максимального значения  $I_0$  (рис. 3). На граничных частотах ПП выполняется условие:

$$n(\xi) = I/I_0 = \frac{1}{\sqrt{1+\xi^2}} = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (13)$$

откуда

$$\xi_{1,2} = X/R = \pm 1.$$

Таким образом, на границах ПП реактивное сопротивление по абсолютной величине равно активному сопротивлению.

Из решения уравнения  $\xi_{1,2} = Q(f/f_0 - f_0/f) = \pm 1$  получим формулы для определения граничных частот ПП  $f_1$  и  $f_2$ .

$$f_{1,2} = f_0 \left( \sqrt{1 + \frac{1}{4Q^2}} \mp \frac{1}{2Q} \right) \approx f_0 \left( 1 \pm \frac{1}{2Q} \right) \quad (14)$$

Абсолютная ширина ПП (см. рис. 3.) колебательного контура

$$S_a = f_2 - f_1 = f_0/Q = df_0, \quad (15)$$

относительная ширина ПП.

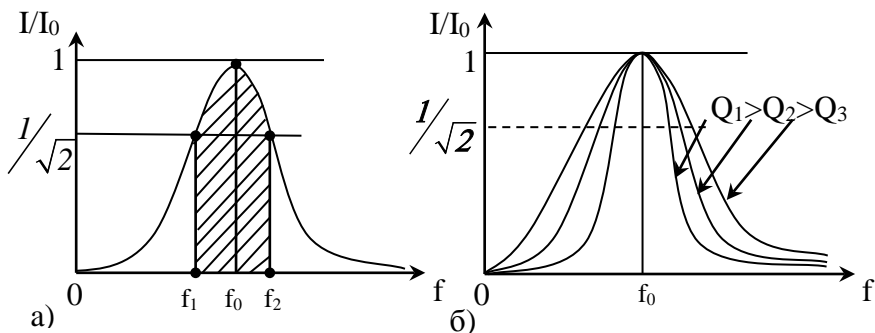


Рис.3. - К определению ПП колебательного контура (а), зависимость формы резонансной кривой от добротности (б).

$$S_0 = (f_2 - f_1)/f_0 = 1/Q = d. \quad (16)$$

Уравнение (15) используется для экспериментального определения добротности колебательного контура по экспериментально измеренным значениям резонансной частоты  $f_0$  и абсолютной ширине ПП  $f_2 - f_1$

$$Q = f_0/(f_2 - f_1). \quad (17)$$

Добротность контура снижают внутреннее сопротивление источника (генератора) сигнала  $R_i$  (рис.4) и сопротивление нагрузки  $R_n$ , подключённая параллельно ёмкости (рис.4), либо индуктивности.

При  $R_n \gg \rho$  эквивалентная добротность колебательного контура с учётом влияния  $R_i$  и  $R_n$  определяется по формуле

$$Q_s = \rho / (R + R_i + \rho^2 / R_n) \quad (18)$$

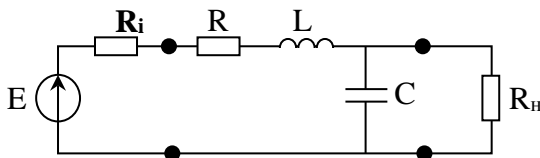


Рис. 4. - Схема подключения колебательного контура к источнику  $E$ ,  $R_i$  и нагрузке  $R_n$

Для моделирования АЧХ и ФЧХ удобно использовать MathCAD.

**Пример 1.** Исследовать АЧХ и ФЧХ последовательного контура, образованного элементами с параметрами:  $R_r = R_l = 20 \text{ Ом}$ ,  $r = 15 \text{ Ом}$ ,  $L = 30 \text{ мГн}$ ,  $C = 300 \text{ нФ}$ . Определить  $f_0$ ,  $Q$ ,  $\Pi$ .

Вводим  $R_l := 25$ ,  $r := 15$ ,  $L := 0.3 \cdot 10^{-3}$ ,  $C := 75 \cdot 10^{-12}$ ,  $\omega(f) := 2 \cdot \pi \cdot f$ , затем задаем:  $R := R_l + r$ ,  $X(f) := \omega(f) \cdot L - 1 / \omega(f) \cdot C$ ,  $f_0 := 1 / 2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C}$ ,  $\omega_0 := 2 \cdot \pi \cdot f_0$ ,  $Q := \omega_0 \cdot L / R$ ,  $\Pi := f_0 / Q$ , причем для ввода греческих букв выполняем операцию  $\text{ctrl} + G$  над соответствующей латинской буквой, например  $t \text{ ctrl} + G = \tau$ ,  $\text{ctrl} + G = \pi$ .

Определяем:

$$f_0 = 1.061 \times 10^6 \quad \omega_0 = 6.667 \times 10^6 \quad Q = 50 \quad \Pi = 2.122 \times 10^4$$

Для построения графика АЧХ нужно по ординате задать верхний предел не менее  $Q$ . Зададим пределы ординаты  $0 \dots 60$ . По абсциссе резонансная характеристика займет полосу частот  $\Pi = 21,2 \text{ кГц}$ . Поэтому нет необходимости задавать широкий частотный интервал. Зададим пределы по абсциссе:  $f_0 - 50000 \dots f_0 + 50000$ . Устанавливаем метки по ординате:  $Q$  и  $Q/2$ , по абсциссе:  $f_0$  и  $f_0 + \Pi$ . Предусмотрим возможность варьирования активного сопротивления контура, для чего вводим:

$$K1(f) := \frac{1}{\omega(f) \cdot C \cdot \sqrt{R^2 + (X(f))^2}}; \quad K2(f) := \frac{1}{\omega(f) \cdot C \cdot \sqrt{(2 \cdot R)^2 + (X(f))^2}}$$

и наблюдаем АЧХ (рис. 5). Констатируем, что увеличение сопротивления контура до  $2R$  вдвое снижает добротность и расширяет полосу пропускания.

Для моделирования ФЧХ используем уравнение (3). Масштаб по абсциссе воспроизводим с рис. 5, по ординате масштаб устанавливается автоматически. Переводим радианы в градусы с умножением правой части на коэффициент  $180/\pi$  и снова исследуем изменение характеристики при варьировании сопротивления:

$$\phi_1(f) := \left( \frac{-\pi}{2} - \operatorname{atan}\left( \frac{X(f)}{R} \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}; \quad \phi_2(f) := \left( \frac{-\pi}{2} - \operatorname{atan}\left( \frac{X(f)}{R \cdot 2} \right) \right) \cdot \frac{180}{\pi}$$

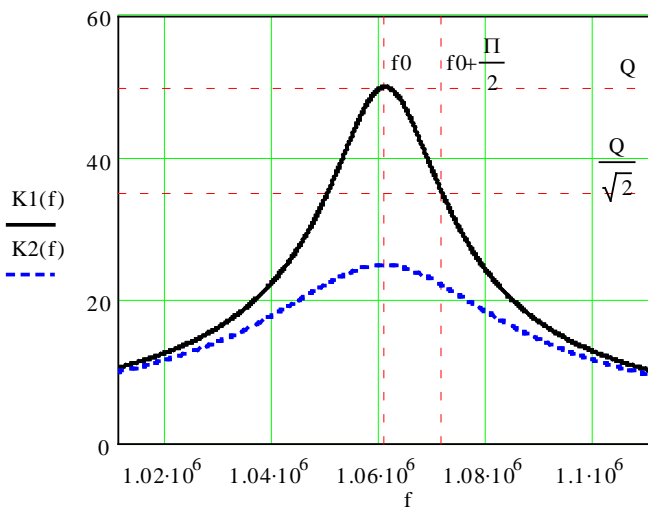


Рис. 5. - АЧХ последовательного контура.

Графики ФЧХ последовательного контура представлены на рис. 6.

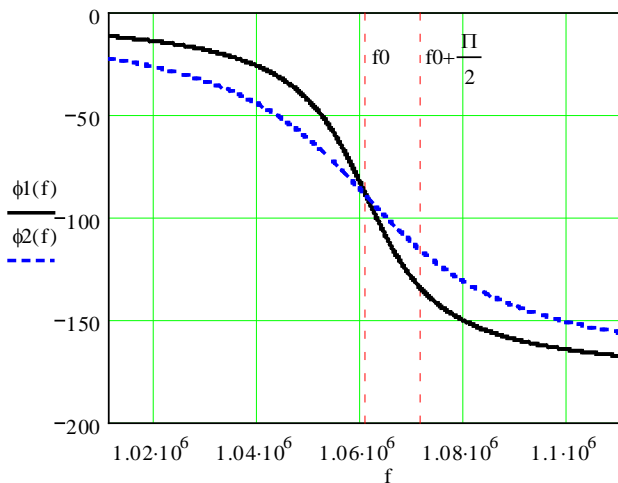


Рис. 6. - ФЧХ последовательного контура

Хорошо видно, что увеличение сопротивления контура снижает крутизну ФЧХ в резонансной области. Если требуется представить АЧХ в относительном масштабе, используется (5). Расстройка задается в долях единицы, поэтому задаем пределы и шаг:  $\varepsilon := -0.1, -0.099.. 0.1$  и затем вводим:

$$K(\varepsilon) := \frac{K_0}{\sqrt{1 + 4 \cdot (\varepsilon)^2 \cdot Q^2}}$$

График АЧХ изображен на рис. 7

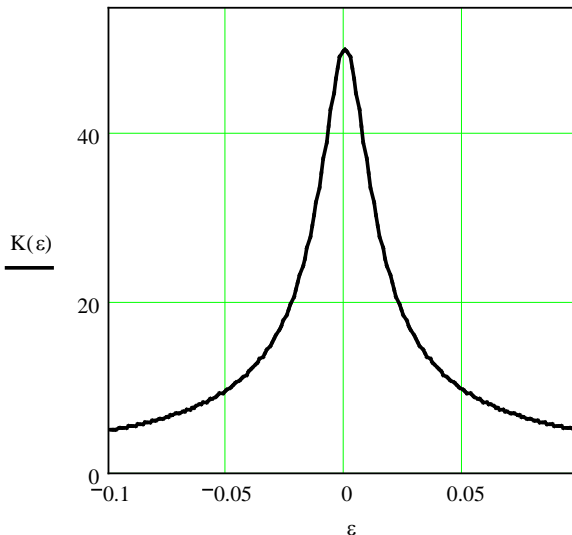


Рис. 7. - АЧХ последовательного контура в функции относительной расстройки.

## 2 Параллельный колебательный контур

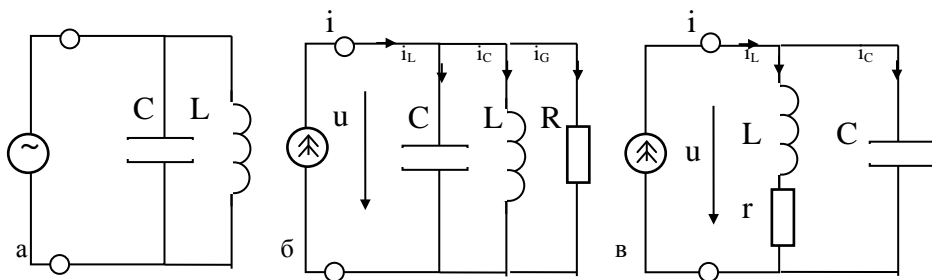


Рис. 8. - Схемы параллельных колебательных контуров:  
 а – принципиальная; б — эквивалентная схема основного вида;  
 в — эквивалентная схема с использованием последовательной  
 схемы замещения индуктивной катушки

Параллельный колебательный контур (рис.8) представляет собой параллельное соединение катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$ , принципиальная схема которого показана на рис. 8а.

На рис. 8б показана эквивалентная схема параллельного колебательного контура, в которой сопротивление  $R$  не является сопротивлением потерь контура, хотя и зависит от него. Параллельная модель удобна при расчете проводимости цепи.

На рис. 8в показана эквивалентная схема параллельного колебательного контура, в которую включено сопротивление потерь  $r$  катушки индуктивности, сопротивление потерь конденсатора в большинстве случаев можно не учитывать.

Входное комплексное сопротивление (8в) определяется выражением

$$Z = \frac{(r + j\omega L) \frac{1}{j\omega C}}{r + j\omega L + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (19)$$

В окрестности частоты  $\omega_0$ , равной



$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (20)$$

пренебрегая в числителе (19) величиной  $r$ , получим

$$Z = \frac{\frac{L}{C}}{r + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}. \quad (21)$$

Обобщенная расстройка контура

$$\xi = \frac{\omega L - \frac{1}{\omega C}}{r} \approx 2Q \frac{\Delta\omega}{\omega_0}, \quad (22)$$

$Q$  - добротность параллельного колебательного контура, равная

$$Q = \frac{\rho}{r}, \quad (22)$$

$\rho$  - характеристическое сопротивление контура,

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = \omega_0 L = \frac{1}{\omega_0 C}. \quad (23)$$

Добротность и характеристическое сопротивление для параллельного колебательного контура совпадают с аналогичными параметрами для последовательного колебательного контура.

В результате из (21) получим выражение для комплексного сопротивления контура через обобщенную расстройку

$$Z = \frac{Q\rho}{1 + j\xi}, \quad (24)$$

из которого можно найти модуль  $Z$ , аргумент  $\varphi$ , активную  $R$  и реактивную  $X$  составляющие,

$$|Z| = \frac{Q\rho}{\sqrt{1 + \xi^2}}, \quad (25)$$

$$\varphi = -\arctg(\xi), \quad (26)$$

$$R = \frac{Q\rho}{1 + \xi^2}, \quad (27)$$

$$X = -\xi \frac{Q\rho}{1 + \xi^2}, \quad (28)$$

Графики этих функций  $\xi$  показаны на рис. 9.

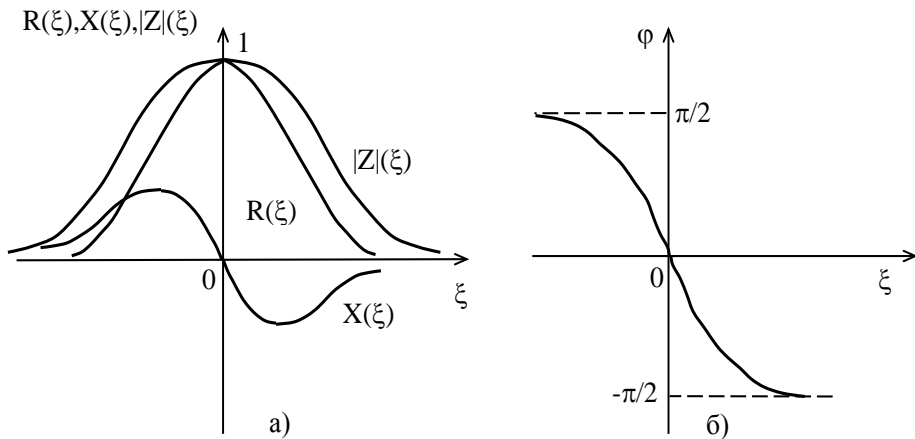


Рис.9

На частоте  $\omega_0$  (20) сопротивление контура максимально, чисто активно и равно

$$R_0 = Q\rho. \quad (29)$$

При отклонении от частоты  $\omega_0$  сопротивление резко падает, появляется реактивная компонента. При  $\omega < \omega_0$  сопротивление контура имеет индуктивный характер, а при  $\omega > \omega_0$  - емкостный, этот же результат вытекает и из анализа фазовой характеристики на рис. 9б.

## Порядок выполнения лабораторной работы

1) Расчёт основных характеристик колебательного контура

Для параметров колебательного контура (рис.1,в) (таб.1) рассчитать резонансную частоту  $f_0$ , характеристическое сопротивление  $\rho$ , добротность  $Q$ , затухание  $d$  и абсолютную ширину ПП. Результаты расчёта занести в табл. 2.

Таблица 1 - Исходные данные.

Вариант №	L, мГн	C, нФ	R, Ом	Вариант №	L, мГн	C, нФ	R, Ом
<b>1</b>	10	50	10	<b>11</b>	15	45	30
<b>2</b>	20	60	20	<b>12</b>	25	55	35
<b>3</b>	30	70	30	<b>13</b>	35	65	40
<b>4</b>	40	80	40	<b>14</b>	45	75	45
<b>5</b>	50	90	50	<b>15</b>	55	85	50
<b>6</b>	60	100	60	<b>16</b>	65	95	60
<b>7</b>	70	40	70	<b>17</b>	75	65	70
<b>8</b>	80	30	80	<b>18</b>	85	45	80
<b>9</b>	90	20	90	<b>19</b>	95	35	90
<b>10</b>	100	10	100	<b>20</b>	110	25	100

Таблица 2 - Параметры колебательного контура

$L=$ _____; $C=$ _____; $R=$ _____; $f_0=$ _____; $\rho=$ _____; $Q=$ _____; $d=$ _____; $S_a=f_2 - f_1=$ _____;
При $R_i=0.5R$ ; $R_H=50$ кОм; $Q_3=$ _____; $d_3=$ _____; $S_{a3}=$ _____

2) Рассчитать эквивалентную добротность  $Q_3$ , эквивалентное затухание  $d_3$  и абсолютную ширину ПП  $S_{a3}$  колебательного контура, если он подключен к генератору с внутренним сопротивлением  $R_i$  и параллельно емкости подключена нагрузка

с сопротивлением  $R_H=50$  кОм (см. рис.4). Результаты расчёта занести в табл.2.

Рассчитать частотные характеристики  $U_R(f)$ ,  $U_L(f)$ ,  $U_C(f)$ ,  $\varphi(f)$  на частотах  $f = f_0 \pm k\Delta f$ , где  $\Delta f = f - f_0 = f_0/2Q$ , где  $\Delta f = f_0/2Q$ ;  $k=0;1;2;3$ .

Результаты расчёта занести в таб. 3.

Таблица 3 - Результаты предварительного расчёта и эксперимента

№	Результаты измерений						Результаты предв. расчёта			
	f	f	$U_R$	$U_L$	$U_C$	$\varphi$	$U_R$	$U_L$	$U_C$	$\varphi$
	кГц	В	В	В	град.	В	В	В	град.	
1	$f_0 - 3\Delta f$									
2	$f_0 - 2\Delta f$									
3	$f_0 - \Delta f$									
4	$f_0$									
5	$f_0 + \Delta f$									
6	$f_0 + 2\Delta f$									
7	$f_0 + 3\Delta f$									

### 3) Исследование RLC-цепи

Соберите в Electronics Workbench. схему, приведённую на рис. 10.

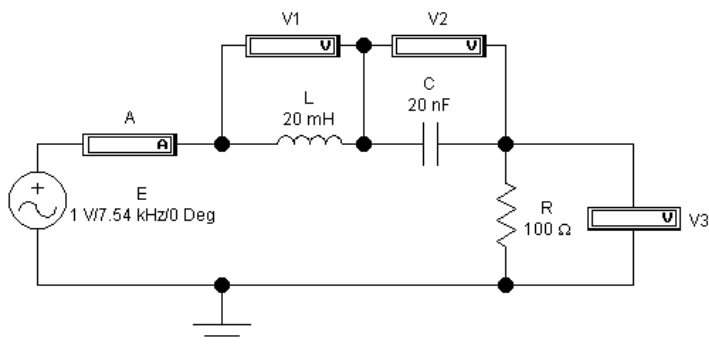


Рис.10. - Схема исследования последовательного RLC-контра на разных частотах

Переустановить генератор на требуемую частоту, напряжение и записать показания амперметра А и вольтметров V1, V2, V3, подключённых параллельно соответственно к индуктивности L, ёмкости C и сопротивлению R. Результаты измерений на всех требуемых частотах занести в табл.3.

4) Измерение сдвига фаз между напряжением и током

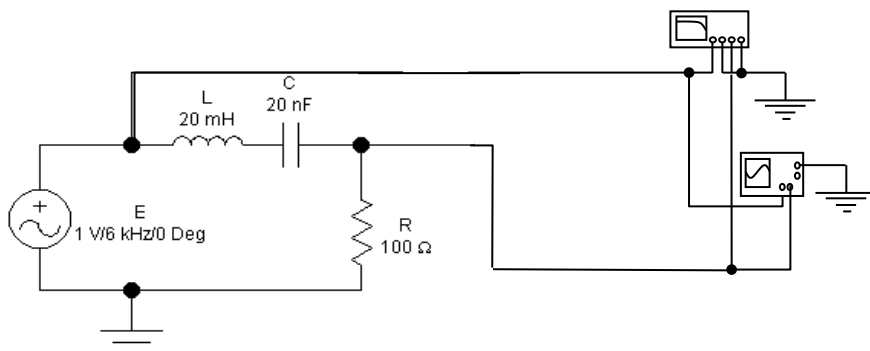


Рис.11. - Схема для измерения  $\varphi(f)$  и мгновенных значений  $u(t)$  и  $u_R(t)$

Для измерения сдвига фаз между входным напряжением и током в RLC-цепи соберите в Electronics Workbench. схему, приведённую на рис 11.

Два раза щёлкнув левой клавишей мыши по изображению измерителя частотных характеристик (ИЧХ) «Plotter», мы раскроем его переднюю панель, и на экране монитора появится частотная характеристика  $\varphi = \psi_u - \psi_i$ , аналогичная той, которая приведена на рис.2,б. Установив курсор слева и нажав левую клавишу мыши на вертикальной оси графика и не отпуская её, перетащить вертикальную линию на ту частоту, на которой требуется выполнить измерение  $\varphi$ . Необходимо учесть, что в исследуемой схеме (рис.11) знак  $\varphi$  получается противоположный истинному знаку.

Далее, сдвигая вертикальную линию вдоль оси частот и, устанавливая её в точки, соответствующие требуемым частотам, измерить  $\varphi$  на всех заданных частотах. Результаты измерений  $\varphi(f)$  заносятся в табл.2. Для измерения мгновенных значений входного напряжения  $u(t)$  и напряжения на сопротивлении  $u_R(t)$  закрывается передняя панель ИЧХ и открывается передняя панель двухканального осциллографа и после установки частоты генератора  $f=f_{\Gamma}$  срисовываются осциллограммы  $u(t)$  и  $u_R(t)$ , которые имеют вид, приведённый на рис.2,б.

### **Контрольные вопросы**

1. Дайте определение резонанса.
2. Выведите условие резонанса в последовательной и параллельной схемах.
3. Как определить добротность контура?
4. Что называется частотными характеристиками двухполюсника?
5. Что такое полоса пропускания контура?
6. Объясните расхождение расчетных и опытных данных в лабораторной работе.
7. Объясните характер зависимостей  $I_{ex}(\omega)$ , полученных в третьем опыте.

## Библиографический список

1. Атабеков, Г.И. Основы теории цепей. Линейные электрические цепи: учеб. пособие. – 7-е изд., стер.– СПб.: Издательство «Лань», 2009. – 592 с.
2. Бессонов, Л.А. Основы теории цепей. Электрические цепи: учебник – 12-е изд., - М.: Юрайт, 2014. - 701с.
3. Бычков, Ю.А. Основы теоретической электротехники: учебное пособие.– 2-е изд., стер.– СПб.: Издательство «Лань», 2008. – 592 с.
4. Практикум на Electronics Workbench: В 2 т./ Под общей ред. Д. И. Панфилова – Т. 1: Электротехника. – М. ДОДЕКА, 1999. – 304с.
5. Попов В.П. Основы теории цепей / В.П. Попов. — М.: Высшая школа, 2007. — 576 с.