

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное автономное образовательное
учреждение высшего образования
«СЕВАСТОПОЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ИНСТИТУТ РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ И ИНФОРМАЦИОННОЙ БЕЗОПАСНОСТИ

Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы
по дисциплине «Основы теории цепей и электротехника»
для студентов очной и заочной форм обучения направлений:
11.03.01 — «Радиотехника», 11.03.02 «Инфокоммуникационные
технологии и системы связи» и специальности 11.05.01 —
«Радиоэлектронные системы и комплексы»

Севастополь
СевГУ
2020

УДК 621.39 (75)

И88

Рецензент:

А. А. Савочкин - канд. техн. наук, доцент

Редактор:

В. Г. Слезкин - канд. техн. наук, доцент

Ответственный за выпуск:

И. Л. Афонин - заведующий кафедрой «Радиоэлектроника и телекоммуникации»,
доктор техн. наук, профессор

Составитель: **С.Р. Зиборов**

И88 **Исследование параллельного колебательного контура:** учеб.-метод. пособие по выполнению лабораторной работы по дисциплине «Основы теории цепей и электротехника» для студентов очной и заочной форм обучения направлений: 11.03.01 — «Радиотехника», 11.03.02 «Инфокоммуникационные технологии и системы связи» и по специальности 11.05.01 — «Радиоэлектронные системы и комплексы» / Сост. С. Р. Зиборов. — Севастополь: СевГУ, 2020. — 14 с.

Целью учебно-методического пособия является оказание помощи студентам в выполнении лабораторных работ по первой части дисциплины «Основы теории цепей и электротехника» и получении теоретических знаний и практических навыков измерения и анализа характеристик электрических цепей.

УДК 621.39 (75)

Учебно-методическое пособие утверждено на заседании кафедры «Радиоэлектроника и телекоммуникации», протокол № 1 от 29 августа 2019 г.

Учебно-методическое пособие рассмотрено и рекомендовано к изданию на заседании учёного совета Института радиоэлектроники и информационной безопасности, протокол № 3 от 23 октября 2019 г.

ВВЕДЕНИЕ

Лабораторные работы выполняются фронтальным методом, в соответствии с которым бригады студентов, состоящие из 2 — 3 человек, выполняют на занятии одну и ту же лабораторную работу.

При подготовке к лабораторной работе необходимо самостоятельно изучить теоретический материал, связанный с темой работы, используя конспект лекций и рекомендованную литературу [1 — 3].

В начале лабораторного занятия необходимо ознакомиться с оборудованием, используемым в лабораторной работе, и изучить правила его эксплуатации. После сборки лабораторной установки следует пригласить преподавателя проверить правильность сборки. Получив разрешение преподавателя, включить питание используемого оборудования и выполнить необходимые экспериментальные исследования.

При проведении экспериментов студенты каждой бригады обязаны вести протокол, в котором фиксируются результаты экспериментов и промежуточных вычислений. Осциллограммы напряжений, полученные с помощью цифрового осциллографа, необходимо зарисовать или скопировать на флешку, подключив её к *USB*-порту осциллографа. По окончании экспериментов необходимо выключить питание лабораторного оборудования.

После завершения работы преподаватель проверяет и подписывает протокол, на основании которого каждый студент оформляет индивидуальный отчет по лабораторной работе в соответствии с методическими указаниями к оформлению текстовых работ [4]. Примерное содержание отчёта представлено в методических указаниях по каждой лабораторной работе.

В тексте отчёта каждому рисунку, таблице должно предшествовать предложение с указанием содержания рисунка, таблицы, а каждой расчётной формуле — описание рассчитываемой величины.

Каждая таблица должна иметь заголовок, состоящий из слова «Таблица», её номера и названия, написанного с заглавной буквы и отделённого от номера знаком «—» (тире).

Под полем каждого рисунка должна быть указана подрисуночная подпись, состоящий из сокращенного слова «Рис.», номера рисунка и его и названия, написанного с заглавной буквы и отделённого от номера знаком «—» (тире).

Защита отчета проводится на очередном занятии перед выполнением следующей лабораторной работы.

1. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Целью работы является исследование частотных характеристик параллельного колебательного контура при гармоническом воздействии.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Колебательными или резонансными цепями называются цепи, в которых возможен резонанс напряжений или резонанс токов. Резонансом напряжений называется режим работы, при котором реактивная составляющая комплексного сопротивления цепи равна нулю, а резонансом токов — режим работы, при котором реактивная составляющая комплексной проводимости цепи равна нулю.

Простейшей цепью, в которой наблюдается резонанс токов, является параллельный колебательный контур, образованный двумя параллельно соединёнными ветвями, содержащими сопротивления, индуктивности и ёмкости (рис. 1). В зависимости от того, как включены индуктивности и ёмкости в ветви параллельного колебательного контура, различают контура: первого вида (рис. 1, а), второго вида (рис. 1, б) и третьего вида (рис. 1, в). Сопротивления R_1 и R_2 учитывают потери в элементах контура.

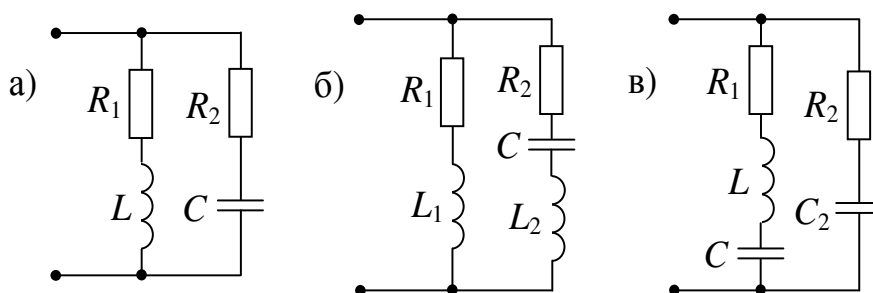


Рис. 1 — Параллельные колебательные контуры первого вида (а), второго вида (б) и третьего вида (в)

Комплексное сопротивление параллельного колебательного контура первого вида

$$\underline{Z} = \frac{(R_1 + j\omega L) \left(R_2 + \frac{1}{j\omega C} \right)}{R_1 + j\omega L + R_2 + \frac{1}{j\omega C}}. \quad (1)$$

Практическое применение находят контура, у которых в области частот, близких к резонансной частоте $\omega \approx \omega_0$, сопротивления потерь много меньше сопротивления реактивных элементов $R_1 \ll L\omega_0$, $R_2 \ll 1/C\omega_0$.

Тогда для указанной области частот, пренебрегая слагаемыми R_1 и R_2 в числителе выражения (1), получаем

$$\underline{Z} = \frac{\frac{L}{C}}{(R_1 + R_2) + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)} = \frac{\rho^2}{R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)}, \quad (2)$$

где $\rho = \sqrt{L/C}$ — волновое сопротивление контура; $R = R_1 + R_2$ — эквивалентное сопротивление потерь контура.

Отсюда комплексная проводимость контура

$$\underline{Y} = \frac{R}{\rho^2} + j\frac{R}{\rho^2}\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right). \quad (3)$$

Тогда в соответствии с условием резонанса токов получаем уравнение

$$\omega_0 L - \frac{1}{\omega_0 C} = 0,$$

которое совпадает с аналогичным уравнением для последовательного контура.

Решая уравнение, находим резонансную частоту параллельного контура

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}, \quad (4)$$

Таким образом, при малых потерях резонансная частота параллельного контура совпадает с резонансной частотой последовательного контура, содержащего такие же реактивные элементы, что и параллельный контур.

Подставляя (4) в (2) находим резонансное сопротивление контура

$$\underline{Z}(\omega)|_{\omega=\omega_0} = \frac{\rho^2}{R} = \frac{\rho}{R}\rho = Q\rho = Q^2 R. \quad (5)$$

Из (5) следует, что резонансное сопротивление параллельного контура превышает в Q раз волновое сопротивление контура и в Q^2 сопротивление потерь контура.

Рассмотрим параллельный контур первого вида, подключённый к источнику тока с внутренним сопротивлением R_i (рис. 2, а).

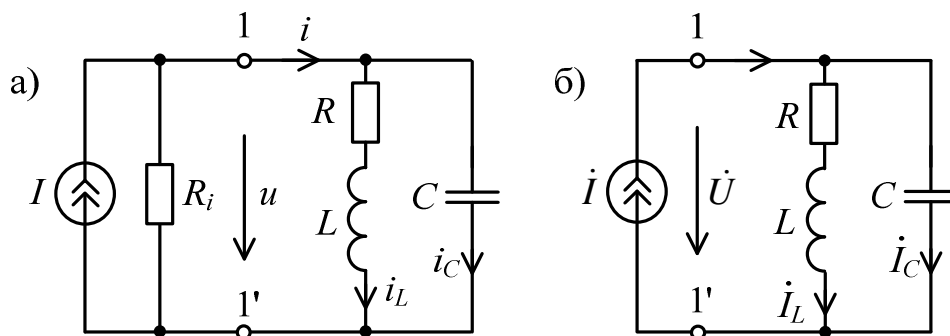


Рис. 2 — Схемы параллельного контура первого вида

При выполнении условия $R_i \gg R_0$ влиянием сопротивления R_i можно пренебречь и упростить схему контура (рис. 2. б).

С учётом (5) действующее значение напряжения на контуре на резонансной частоте

$$U = R_0 I = \rho^2 \frac{I}{R},$$

где I — действующее значение тока источника (рис. 2, б).

Поскольку на резонансной частоте сопротивления ветвей контура приблизительно одинаковы, то действующие значения токов ветвей контура также приблизительно равны

$$I_C|_{\omega=\omega_0} \approx I_L|_{\omega=\omega_0} \approx \frac{U}{\rho} = \frac{\rho I}{R} = QI$$

и в Q раз превышают ток I источника тока.

Поэтому резонансный режим работы параллельного контура называют резонансом токов.

Комплексное сопротивление параллельно контура может быть преобразовано из алгебраической формы (2) в показательную форму

$$\underline{Z} = \frac{R_0}{1 + jQ\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)} = Z(\omega)e^{j\varphi(\omega)},$$

где $z(\omega) = R_0 / \sqrt{1 + Q^2\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)^2}$ и $\varphi(\omega) = -\arctg Q\left(\frac{\omega}{\omega_0} - \frac{\omega_0}{\omega}\right)$ — модуля и аргумента комплексного сопротивления контура.

Частотные зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления параллельного контура изображены на рис. 3.

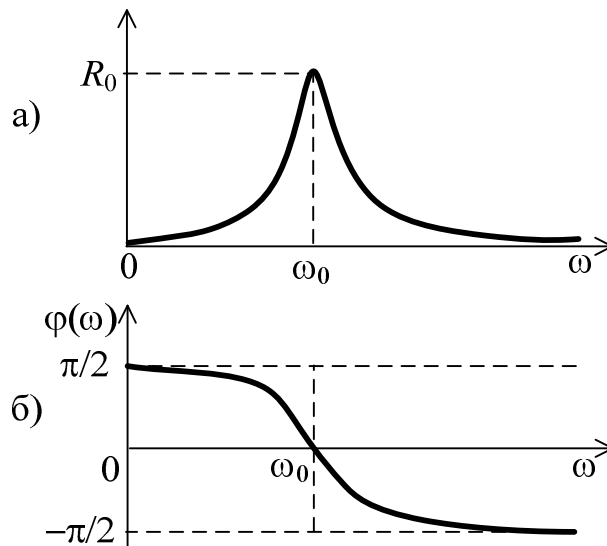


Рис. 3 — Частотные зависимости модуля (а) и аргумента (б) комплексного сопротивления параллельного контура первого вида

На резонансной частоте $\omega = \omega_0$ сопротивление параллельного контура имеет чисто резистивный характер, поскольку его аргумент равен нулю $\varphi = 0$, и достигает максимального значения R_0 (рис. 3, а). На частоте меньше резонансной

нансной сопротивление контура имеет резистивно-индуктивный характер, поскольку его аргумент является положительным $0 < \varphi < \pi/2$, а на частоте больше резонансной — резистивно-емкостной, так как его аргумент становится отрицательным $0 > \varphi > -\pi/2$ (рис. 3, б).

К передаточным функциям параллельного контура относятся комплексный коэффициент передачи по току ветви, содержащей индуктивность,

$$K_L(j\omega) = \frac{\dot{I}_L}{\dot{I}} = \frac{\dot{U} / \underline{Z}_L}{\dot{U} / \underline{Z}} = -j \frac{1}{\omega L} \underline{Z} = Q \frac{\omega_0}{\omega} \frac{z(\omega)}{R_0} z e^{j[\varphi(\omega) - \pi/2]} = K_L(\omega) e^{j\varphi_L(\omega)}$$

и комплексный коэффициент передачи по току ветви, содержащей ёмкость,

$$K_C(j\omega) = \frac{\dot{I}_C}{\dot{I}} = \frac{\dot{U} / \underline{Z}_C}{\dot{U} / \underline{Z}} = j\omega C \underline{Z} = Q \frac{\omega}{\omega_0} \frac{z(\omega)}{R_0} z e^{j[\varphi(\omega) + \pi/2]} = K_C(\omega) e^{j\varphi_C(\omega)},$$

где $K_L(\omega)$, $K_C(\omega)$ и $\varphi_L(\omega)$, $\varphi_C(\omega)$ — амплитудно-частотные характеристики (АЧХ) и фазочастотные характеристики (ФЧХ) контура (рис. 4).

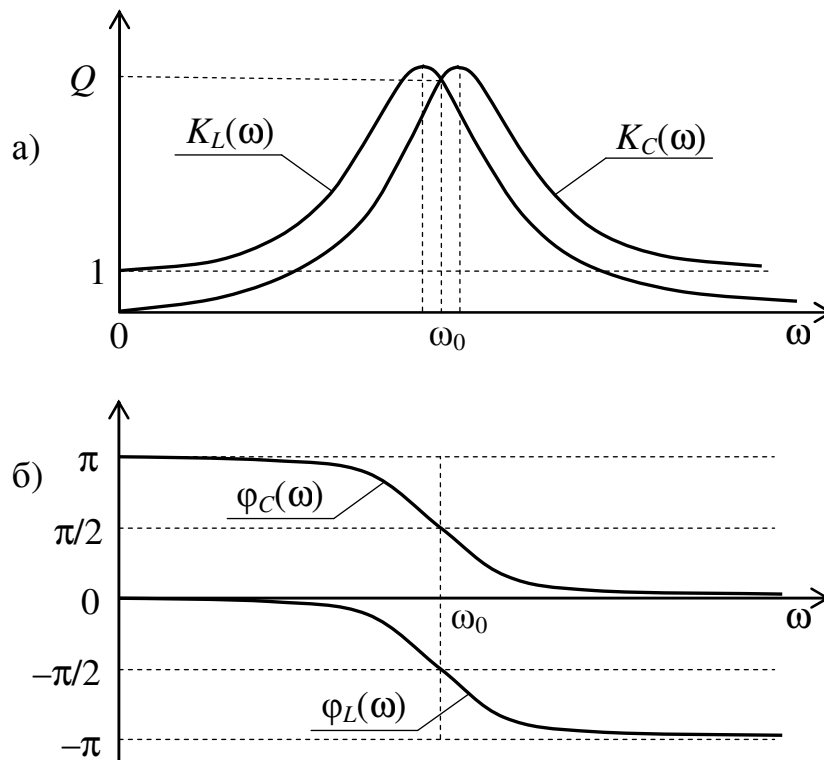


Рис. 4 — АЧХ (а) и ФЧХ (б) параллельного контура первого вида

Если добротность контура $Q \geq 20$, то сдвиг максимумов АЧХ $K_L(\omega)$ и $K_C(\omega)$ относительно резонансной частоты контура пренебрежимо мал, а значения максимумов практически равны добротности контура $K_{Lmax} = K_{Cmax} = Q$.

Полоса пропускания параллельного контура рассчитывается также как полоса пропускания последовательного контура

$$\Pi_{0,7} = f_B - f_H \approx \frac{f_0}{Q},$$

где f_H и f_B — верхняя и нижняя граничные частоты полосы пропускания, но которых АЧХ контура уменьшается до уровня $1/\sqrt{2} \approx 0,7$ относительно её максимального значения и составляет $K_{max}/\sqrt{2} \approx 0,707Q$.

При добротности $Q \geq 20$ АЧХ параллельного контура быстро убывает за пределами полосы пропускания, что позволяет его использовать в радиотехнических устройствах в качестве частотно-избирательной цепи. Выделение требуемого участка частотного диапазона осуществляется путём изменения параметров реактивных элементов контура. Это вызывает изменение резонансной частоты контура и сдвиг по частоте его полосы пропускания.

Подключение параллельно контуру сопротивления, удовлетворяющего условию $R_H \gg R_0$, практически не влияет на резонансную частоту, но вызывает рост сопротивления потерь контура на величину

$$R_{BH} = \frac{\rho^2}{R_H},$$

которую называют вносимым сопротивлением.

В результате, уменьшается эквивалентная добротность контура и ухудшается его частотная избирательность.

3. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ

3.1. При выполнении лабораторной работ используются модули стенда «Радиотехнические цепи и сигналы»: «Линейные цепи» и «Функциональный генератор», а также осциллограф DSOX1102G.

Собрать лабораторную установку (рис. 5) для исследования частотных характеристик ненагруженного параллельного колебательного контура.

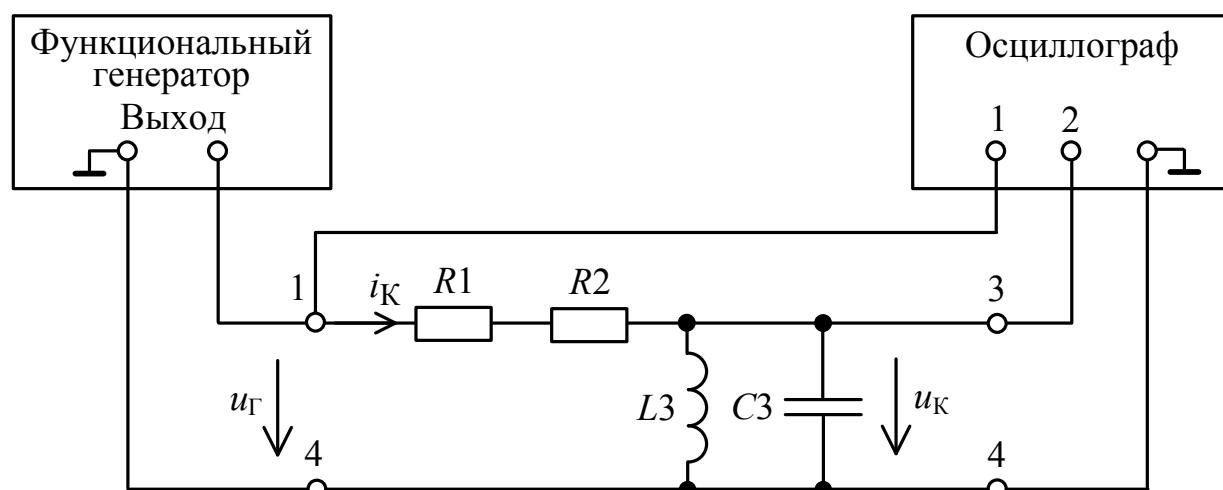


Рис. 5 — Схема лабораторной установки для исследования частотных характеристик ненагруженного параллельного контура

Внимание. При сборке необходимо следить за тем, чтобы нумерация используемых элементов модулей совпадала с нумерацией элементов, указанной на схеме лабораторной установки.

Переключая тумблеры на передней панели модуля «**Линейные цепи**», собрать цепь в виде последовательного соединения двух сопротивлений R_1 , R_2 и параллельного контура, содержащего индуктивность L_3 и ёмкость C_3 .

Вход первого канала «1» осциллографа подключить к гнездам 1, 4, а вход второго канала «2» — к исследуемому контуру (гнезда 3, 4).

3.2. Установить значения сопротивлений $R_1 = R_2 = 10$ кОм, индуктивности $L_3 = 1$ мГн, при котором её омическое сопротивление $R_L = 3$ Ом, и значение ёмкости $C_3 = 33$ нФ. Установленные значения параметров элементов контура L_3 , R_L , C_3 занести в таблицу 1.

Таблица 1 — Параметры ненагруженного параллельного контура

Параметры элементов контура			Расчетные значения параметров контура		
L_3 , мГн	R_L , Ом	C_3 , нФ	f_0 , кГц	Q	$\Pi_{0,7}$, Гц

3.3. Рассчитать резонансную частоту $f_0 = 1/2\pi\sqrt{L_3 C_3}$ и волновое сопротивление контура $\rho = 2\pi f_0 L_3$. Рассматривая функциональный генератор вместе с сопротивлениями R_1 , R_2 как источник тока с внутренним сопротивлением $R_i = R_1 + R_2 = 20$ кОм, рассчитать сопротивление потерь, вносимое в контур источником тока, по формуле $R_{вн1} = \rho^2 / R_i$. Рассчитать добротность $Q = \frac{2\pi f_0 L}{R_L + R_{вн1}}$ и полосу пропускания контура $\Pi_{0,7} \approx f_0 / Q$ и полученные значения f_0 , Q , $\Pi_{0,7}$ занести в таблицу 1.

3.3. Представить собранную установку для проверки преподавателю и, получив разрешение на выполнение экспериментов, включить питание модуля «**Функциональный генератор**» и осциллографа.

3.4. Включить в модуле «**Функциональный генератор**» режим генерирования гармонического напряжения. Установить амплитуду выходного напряжения генератора равной $U_{mГ} = 3$ В. Контроль амплитуды напряжения осуществлять по осциллограмме на экране осциллографа. При измерении частотных характеристик контура необходимо поддерживать постоянство указанной амплитуды при любой частоте настройки генератора.

3.5. На передней панели осциллографа нажать кнопку «**Auto Scale**» для автоматического масштабирования осциллограмм, а также кнопку «**Default Setup**» для установки настроек осциллографа по умолчанию, что обеспечивают синхронизацию осциллографа напряжением первого канала.

3.6. Плавно изменяя частоту генератора, установить её равной резонансной частоте f'_0 контура, при которой амплитуда напряжения на контуре достигает максимального значения $U_{mК max}$. Частота генератора определяется по показа-

ниям частотомера, встроенного в модуль «**Функциональный генератор**». Значения резонансной частоты f'_0 и амплитуды напряжения U_{mKmax} занести в протокол.

3.7. Вращая ручку «**Push Fine**» в секторе «**Horizontal**» добиться устойчивого изображения (2...3) периодов выходного напряжения генератора $u_{Г}$. Скопировать на флешку осциллограммы напряжений $u_{Г}$ и $u_{К}$.

3.8. Поскольку напряжение генератора $u_{Г}$ совпадает по фазе с входным током контура, то фазовый сдвиг между напряжениями $u_{Г}$ и $u_{К}$ равен значению ФЧХ контура на частоте этих напряжений.

Включить в осциллографе режим автоматического измерения фазового сдвига между входными напряжениями осциллографа. Для этого необходимо нажать кнопку «**Meas**», которая расположена в секторе «**Measure**» передней панели осциллографа. В открывшемся на дисплее меню, выбрать команду «**Измерение**», поворачивая ручку «**Entry**», и нажать кнопку, расположенную справа от команды «**Измерение**». При этом слева от основного меню открывается дополнительное меню. Поворачивая ручку «**Entry**», выбрать в дополнительном меню команду «**Фаза**». При этом под командой «**Измерение**» основного меню появляется надпись «**Фаза**». Подтвердить сделанный выбор нажав на кнопку, расположенную справа от команды основного меню «**Добавить измерение**», после чего в правой нижней части дисплея появиться надпись «**Фаза (1→2)**» и значение фазового сдвига в градусах между входными напряжениями осциллографа. Для закрытия меню нажмите ручку «**Entry**».

3.9. Измерить нормированную АЧХ и ФЧХ ненагруженного контура. Для этого, изменяя частоту генератора относительно резонансной частоты f'_0 контура как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения частоты определить частоты f и амплитуды напряжения U_{mK} на контуре, при которых нормированная АЧХ $K_H = U_{mK} / U_{mKmax}$ (отношение амплитуды напряжения на контуре к её максимальному значению) принимает значения, указанные в первой строке таблицы 2. Найденные значения частоты f , амплитуды напряжения U_{mK} и фазового сдвига ϕ занести в таблицу 2.

Таблица 2 — Результаты измерения нормированной АЧХ и ФЧХ ненагруженного контура

K_H	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0.1
f , Гц													
U_{mK} , В													
ϕ , град													

3.10. Подключить помощью тумблера параллельно контуру сопротивление R_3 в качестве нагрузки контура (рис. 6)

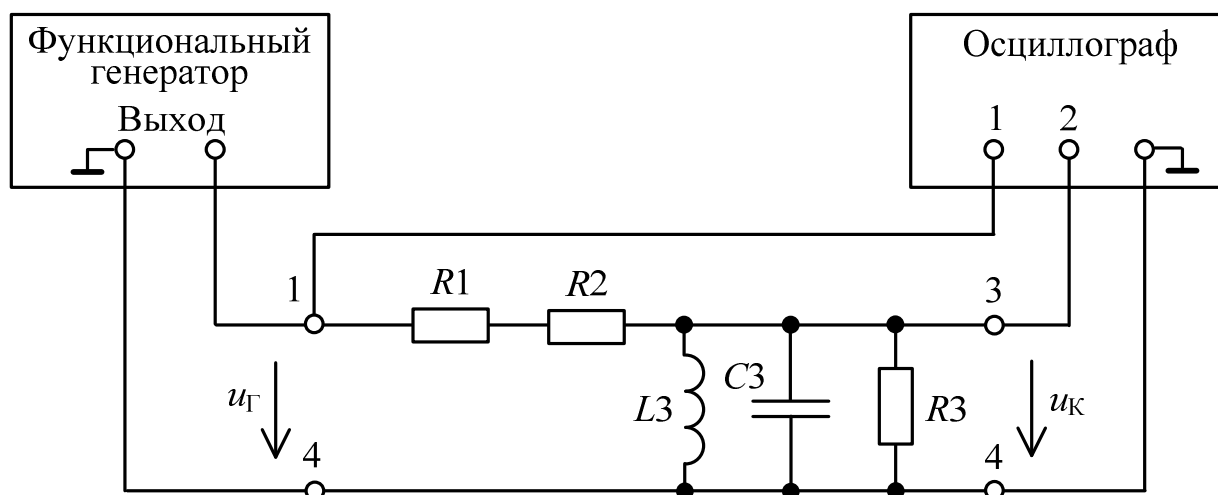


Рис. 6 — Схема лабораторной установки для исследования частотных характеристик нагруженного параллельного контура

3.11. Учитывая, что значение сопротивления $R_3 = 10 \text{ кОм}$, рассчитать сопротивление потерь, вносимое в контур нагрузкой по формуле $R_{\text{вн}2} = \frac{\rho^2}{R_3}$. С учётом потерь, вносимых источником энергии сопротивление нагрузки рассчитать добротность $Q = \frac{2\pi f_0 L}{R_L + R_{\text{вн}1} + R_{\text{вн}2}}$ и полосу пропускания контура $\Pi_{0,7} \approx f_0 / Q$. Значения параметров элементов C_3 , L_3 , R_L и рассчитанные значения f_0 , Q , $\Pi_{0,7}$ занести в протокол.

3.12. Выполняя действия, указанные в п. п. 3.7 — 3.8, измерить АЧХ и ФЧХ нагруженного контура. Результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3 — Результаты измерения АЧХ и ФЧХ нагруженного контура

K_H	0,1	0,3	0,5	0,7	0,8	0,9	1	0,9	0,8	0,7	0,5	0,3	0,1
f , Гц													
U_{mK} , В													
φ , град													

3.13. Представить протокол лабораторной работа на проверку преподавателю. После проверки выключить питание модуля «Функциональный генератор» и осциллографа и разобрать лабораторную установку.

4. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

4.1. Отчет должен содержать:

- титульный лист (см. Приложение А);
- цель работы;
- схемы лабораторных установок;
- краткое описание выполненных экспериментов и расчётов, таблицы с

результатами экспериментальных измерений и расчётные формулы;

— выводы по работе.

4.2. По экспериментальным данным, полученным при выполнении п. 3.9 и 3.12, построить ФЧХ и нормированную АЧХ ненагруженного и нагруженного параллельных контуров.

4.3. По экспериментально найденным нормированным АЧХ контуров определить резонансную частоту и полосу пропускания каждого из исследованных контуров. Используя найденные значения резонансной частоты и полосы пропускания, рассчитать добротность, волновое сопротивление и сопротивление потерь контуров.

4.4. В выводах привести сравнительный анализ расчётных и экспериментально измеренных параметров исследованных параллельных колебательных контуров и указать причины их отличия.

5. ВОПРОСЫ ДЛЯ САМОКОНТРОЛЯ

5.1. Какие цепь называют параллельными контурами первого, второго и третьего вида, и каковы области их применения?

5.2. Что называется резонансом токов параллельного контура, и при каких условиях он возникает?

5.3. Как определяются комплексное сопротивление и комплексная проводимость параллельного контура?

5.4. Как определяются характеристическое сопротивление и добротность параллельного контура?

5.5. Какой вид имеют частотные зависимости модуля и аргумента комплексного сопротивления параллельного контура первого вида?

5.6. Как связаны добротность и полоса пропускания параллельного колебательного контура?

5.7. Как определяется комплексный коэффициент передачи по току параллельного контура первого вида?

5.8. Какой вид имеют АЧХ и ФЧХ параллельного контура?

5.9. Какой характер имеет сопротивление параллельного контура на резонансной частоте, а также на частотах ниже и выше резонансной частоты?

5.10. Чему равен фазовый сдвиг между напряжением и током параллельного контура на резонансной частоте и на границах полосы пропускания $\Pi_{0,7}$?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Попов, В. П. Основы теории цепей / В. П. Попов. — М.: Высшая школа, 2000. — 574 с.
2. Атабеков, Г. И. Теоретические основы электротехники / Г. И. Атабеков. — М.: Энергия, 1978. — 420 с.
3. Зевеке, Г. В. Основы теории цепей / Г. В. Зевеке, П. А. Ионкин, А. В. Нетушил, С. В. Страхов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 528 с.
4. Оформление текстовых работ: методические указания / СевГУ; сост. В. Г. Слёзкин, П. П. Ермолов. — Севастополь: Изд-во СевГУ, 2015. — 19 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А
Образец титульного листа

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»
Институт радиоэлектроники и информационной безопасности
Кафедра «Радиоэлектроника и телекоммуникации»

ОТЧЁТ
по лабораторной работе

« _____ »
(название лабораторной работы)
по дисциплине «Основы теории цепей и электротехника»

Выполнил студент _____
(фамилия, инициалы)

Группа _____

Отметка о защите _____

Преподаватель _____
(фамилия, инициалы)

Севастополь
20__

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

*Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы*

*Составители: **Зиборов** Сергей Родионович*

В авторской редакции

Изд. № 301/19. Объем 1 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»