

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 ДВУХ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

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

Р е ц е н з е н т:

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 двух связанных колебательных контуров: 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

Исследование резонансных свойств и измерение частотных характеристик двух связанных колебательных контуров.

2. ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ

Два колебательных LC -контур называют связанными, если возбуждение колебаний в одном из них приводит к возникновению колебаний в другом.

В зависимости от вида элемента, с помощью которого осуществляется связь между контурами, различают связанные контура с трансформаторной, индуктивной, емкостной связью. По способу включения элемента связи связанные контура подразделяются на контура с внешней связью и контура с внутренней связью. Электрические схемы связанных контуров с различными видами связи показаны на рис. 1.

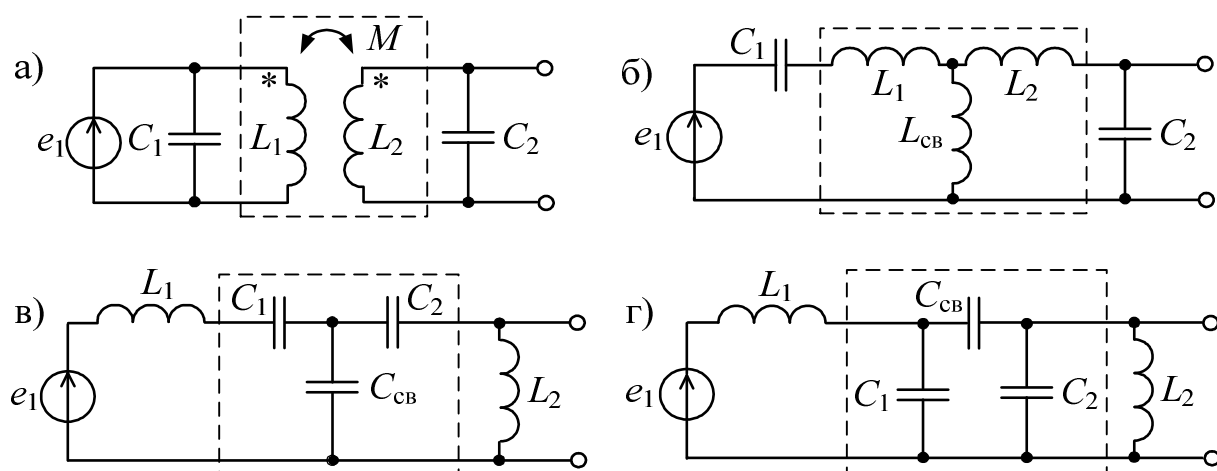


Рис. 1 — Схемы связанные контура с различными видами связи: трансформаторной (а), внутрииндуктивной (б), внутриемкостной (в) и внешнеемкостной (г)

Контур, к которому подключен источник энергии, называется первичным, а контур, с которого снимается выходное напряжение, — вторичным.

Каждому типу связанных контуров можно поставить в соответствие четырехполюсник связи, выделенный на рис. 1 пунктирной линией. Коэффициентом связи контуров называют среднее геометрическое коэффициентов передачи K_{12} и K_{21} по напряжению четырехполюсника связи

$$k_{св} = \sqrt{K_{21}K_{12}},$$

где $K_{21} = \left. \frac{\dot{U}_2}{\dot{U}_1} \right|_{i_2=0}$ — коэффициент передачи четырехполюсника связи из пер-

вичного контура во вторичный; $K_{12} = \frac{\dot{U}_1}{\dot{U}_2} \Big|_{I_1=0}$ — коэффициент передачи четырехполюсника связи из вторичного контура в первичный.

В случае индуктивной трансформаторной связи между контурами коэффициент связи

$$k_{\text{св}} = \sqrt{\frac{j\omega M}{j\omega L_1} \cdot \frac{j\omega M}{j\omega L_2}} = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}, \quad (1)$$

где M — взаимная индуктивность контуров.

Поскольку взаимная индуктивность не может превышать среднее геометрическое значение контурных индуктивностей $M \leq \sqrt{L_1 L_2}$, то из выражения (1) следует, что коэффициент связи должен удовлетворять условию $k_{\text{св}} \leq 1$. Аналогичный вывод справедлив и для других видов связи между контурами.

Настройка связанных контуров выполняется путём изменения параметров реактивных элементов контуров и элемента связи между ними с целью достижения максимума тока вторичного контура. Способы настройки связанных контуров различают по виду резонанса, получаемого в результате настройки: первый частный резонанс, второй частный резонанс, сложный резонанс и полный резонанс.

Настройка на первый частный резонанс выполняется путем изменения параметров реактивных элементов только первичного контура. При этом параметры элементов вторичного контура и элементов связи не изменяют.

Настройка на второй частный резонанс осуществляется путем изменения параметров реактивных элементов только вторичного контура, при этом параметры элементов первичного контура и элементов связи не изменяют.

Настройка на сложный резонанс выполняется в два этапа. На первом этапе выполняется настройка на первый или второй частный резонанс, а на втором этапе, увеличивают ранее полученный максимум тока вторичного контура, изменяя параметр элемента связи. В результате, получают так называемый максимум максимумов тока вторичного контура.

Настройка на полный резонанс выполняется в три этапа. На первом этапе размыкают вторичный контур и настраивают на резонанс первичный контур, добиваясь максимума его тока путём изменения параметров реактивных элементов контура. На втором этапе замыкают вторичный контур и при достаточно слабой связи между контурами или при разомкнутом первичном контуре настраивают вторичный контур на резонанс, обеспечивающий максимум его тока. На третьем этапе путём изменения параметра элемента связи добиваются увеличения ранее полученного максимума тока вторичного контура, то есть добиваются максимума максимумов этого тока.

Анализ показывает, что при настройке на сложный и полный резонанс достигается одно и то же значение максимума тока вторичного контура. Однако при настройке на полный резонанс этот максимум достигается при меньшем сопротивлении связи между контурами, и, следовательно, при меньших вноси-

мых сопротивлениях потерь, что позволяет повысить добротность контуров и улучшить их частотную избирательность.

В случае идентичных контуров оптимальный коэффициент связи при настройке на полный резонанс примерно равен затуханию контура

$$k_{св} \approx \frac{1}{Q} = d.$$

В качестве амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) связанных контуров может рассматриваться зависимость тока вторичного контура от обобщенной расстройки ξ . Если в качестве нормирующего значения выбрать максимум максимум тока $I_{2maxmax}$ вторичного контура, то нормированная АЧХ будет иметь вид

$$I_{2н} = \frac{I_2}{I_{2maxmax}} = \frac{2A}{\sqrt{(1 - \xi^2 + A^2)^2 + 4\xi^2}},$$

где I_2 — ток вторичного контура; $A = k_{св}Q$ — параметр связи.

При настройке на полный резонанс, когда $k_{св} = 1/Q$, параметр связи достигает критического значения, равного единице $A = 1$.

На рис. 2 изображены нормированные АЧХ двух связанных колебательных контуров при различных значениях параметра связи A .

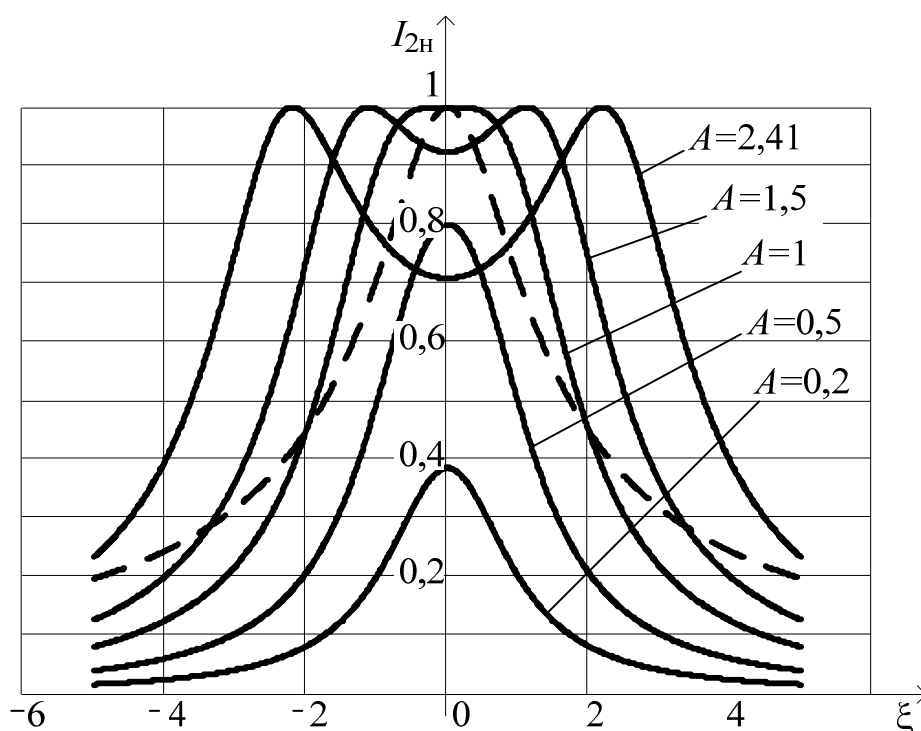


Рис. 2 — Амплитудно-частотные характеристики связанных контуров при различных значениях параметрах связи A

При слабой связи между контурами ($0 < A < 1$) АЧХ имеет вид «одногогорбой» кривой, которая на резонансной частоте достигает максимального значения, не превышающего единицу. При критической связи ($A = 1$) форма АЧХ остаётся одногорбой, а её вершина достигает значения $I_{2н\ max} = 1$ и немного уплощается. При сильной связи ($A > 1$) ток вторичного контура на резонансной частоте ($\xi = 0$) начинает уменьшаться, и АЧХ приобретают вид «двугорбой» кривой. Существование двух максимумов объясняется тем, что при сильной связи контура вносят друг в друга реактивное сопротивление, которое вызывает сдвиг их резонансных частот в противоположных направлениях.

На рис. 2 пунктирной линией показана АЧХ одиночного колебательного контура. Из рисунка видно, что связанные контура обеспечивают существенно лучшую частотную избирательность за счёт большей крутизны склонов на границах полосы пропускания. Дополнительным преимуществом связанных контуров является возможность плавно изменять ширину полосы пропускания путём изменения коэффициента связи между контурами.

3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

На рис. 3 показана схема лабораторной установки для исследования связанных контуров, которая состоит из макета связанных контуров и осциллографа **DSOX1102G**.

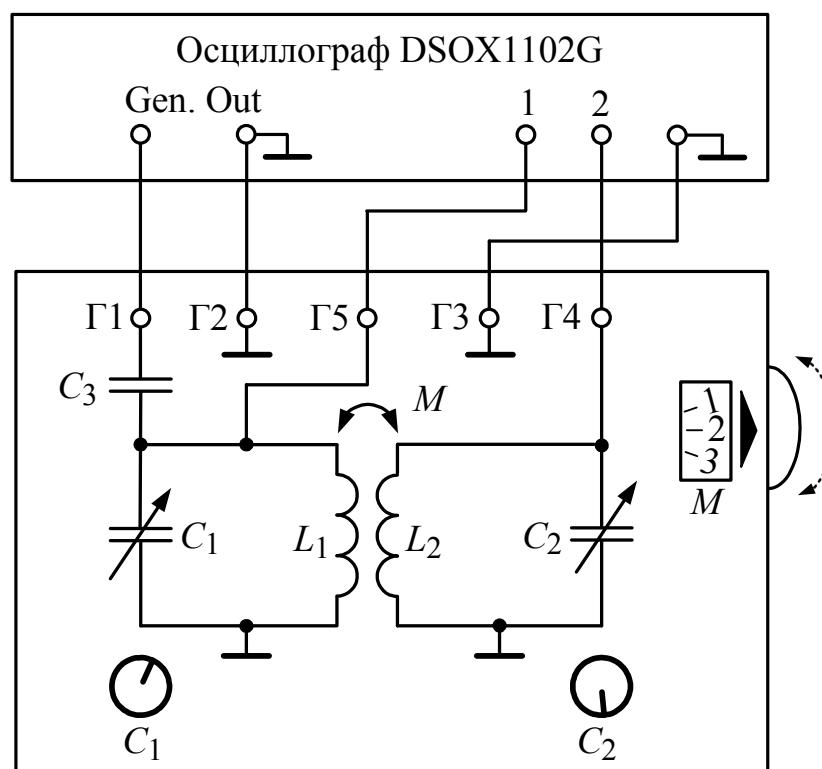


Рис. 3 — Схема лабораторной установки для исследования связанных контуров

В качестве источника входного сигнала связанных контуров используется генератор, встроенный в осциллограф **DSOX1102G**. Выход генератора «**Gen**

Out» расположен в середине нижней части передней панели осциллографа.

В режиме генерирования синусоидального напряжения генератор обеспечивает следующие технические характеристики:

- частотный диапазон — от 0,1 Гц до 20 МГц;
- амплитуда напряжения — от 1 мВ до 6 В;
- выходное сопротивление — 50 Ом;
- автоматическая защита от перегрузки.

На передней панели макета связанных контуров изображены: схема связанных контуров. Первичный контур состоит из конденсатора переменной ёмкости C_1 и катушки индуктивности L_1 , а вторичный контур — из конденсатора переменной ёмкости C_2 и катушки индуктивности L_2 . Обе катушки имеют индуктивность порядка 400 мкГн. Ёмкость контурных конденсаторов регулируется с помощью ручек C_1 и C_2 в диапазоне от 12 до 350 пФ, что позволяют осуществлять независимую перестройку контуров по частоте.

Связь между контурами осуществляется за счёт взаимной индукции контурных катушек индуктивности L_1 и L_2 . Изменение коэффициента индуктивной связи $k_{св}$ между катушками достигается путём изменения их взаимного расположения при повороте одной из катушек относительно другой с помощью поворотного диска, расположенного на правой боковой панели макета. Шкала поворотного диска отградуирована в градусах угла α между осями катушек. Возможные направления поворота диска показаны на рис. 3 пунктирной линией. Угол $\alpha = 90^\circ$ соответствует ортогональному расположению осей катушек, при котором связь между катушками минимальна, а угол $\alpha = 0^\circ$ — соосному расположению катушек, при котором связь между катушками максимальна.

Входное напряжение подается на гнезда Г1 — Г2 и поступает на первичный контур через разделительный конденсатор $C_3 = 56$ пФ. Выходное напряжение первичного контура снимается с гнезд Г5 — Г3, а выходное напряжение вторичного контура — с гнезд Г4 — Г3.

4. Порядок выполнения работы

4.1. Собрать лабораторную установку (рис. 3). Выход генератор, встроенного в осциллограф, подключить к входу лабораторного макета (гнезда Г1 — Г2), вход первого канала «1» осциллографа — к первичному контуру (гнезда Г5 — Г3), а вход второго канала «2» — к вторичному контуру (гнезда Г4 — Г3).

4.2. Установить поворотный диск, регулирующий взаимное расположение осей катушек индуктивности, на деление «90°», соответствующее минимальной связи между контурными катушками.

4.3. Представить собранную установку для проверки преподавателю. Получив разрешение на выполнение экспериментов, включить питание осциллографа.

4.4. Включить в генераторе режим генерирования синусоидального напряжения и установить значения частоты и амплитуды этого напряжения, заданные преподавателем.

Для включения режима генерирования синусоидального напряжения необходимо нажать кнопку «**WaveGen**», которая расположена на передней панели осциллографа в секторе «**Wave-form**» (рис. 4). После нажатия кнопка «**WaveGen**» светится синим цветом, а на дисплее открывается меню «**Ген. Сигн.**» на русском языке.

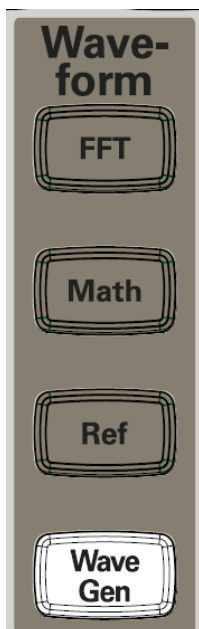


Рис. 4 — Сектор «**Wave form**»

Для выбора синусоидальной формы напряжения нажмите кнопку, расположенную справа от опции меню «**Сигнал**» и в открывшемся дополнительном меню, поворачивая ручку «**Entry**», выберете команду «**Синус**».

Установите значения частоты и амплитуды выходного напряжения генератора, заданные преподавателем.

Для установки частоты напряжения нажмите кнопку, расположенную справа от опции меню «**Частота**», и, поворачивая ручку «**Entry**», установите требуемое значение частоты, которой индицируется в нижней части дисплея осциллографа. Шаг перестройки частоты зависит от скорости вращения ручки «**Entry**». Для включения режима точной установки частоты нажмите на ручку «**Entry**», после чего в меню под опцией «**Частота**» появляется надпись «**точн.**».

Для установки амплитуды напряжения нажмите кнопку, расположенную справа от опции меню «**Амплитуда pp**» (амплитуда от пика до пика, то есть удвоенная амплитуда). Поворачивая ручку «**Entry**», установите требуемое значение амплитуды, которое индицируется в нижней части дисплея. Шаг перестройки амплитуды зависит от скорости вращения ручки «**Entry**». Для включения режима точной установки амплитуды следует нажать на ручку «**Entry**», после чего в меню под опцией «**Амплитуда pp**» появляется надпись «**точн.**».

4.5. На передней панели осциллографа нажать кнопку «**Auto Scale**» для автоматического масштабирования осциллограмм, а также кнопку «**Default Setup**» для установки настроек осциллографа по умолчанию, которые обеспечивают синхронизацию осциллографа напряжением первого канала. Вращая ручку «**Push Fine**» в секторе «**Horizontal**», добиться устойчивого изображения (2...3) периодов сигнала.

4.6. Изменяя ёмкость конденсатора C_1 первичного контура, настроить его в резонанс на частоте входного напряжения (первый частный резонанс). Значение частоты первого частного резонанса занести в протокол.

4.7. Увеличить связь между контурами, установив поворотный диск на деление «**80°**».

4.8. Изменяя ёмкость конденсатора C_2 настроить вторичный контур в резонанс на частоте входного напряжения (второй частный резонанс). Значение частоты второго частного резонанса занести в протокол.

4.9. Поворачивая поворотный диск, измерить зависимость амплитуды напряжения U_{m2} на вторичном контуре от угла α между осями контурных кату-

шек индуктивности, изменяя угол α от 0 до 90° с шагом 10° . Полученные результаты занести в таблицу 1.

Таблица 1 — Зависимость амплитуды напряжения на вторичном контуре от угла α между осями контурных катушек индуктивности

α , град	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90
U_{m2} , В										

4.10. Найти и подчеркнуть в таблице значение угла $\alpha = \alpha_0$, при котором амплитуды напряжения на вторичном контуре достигает максимального значения $U_{2\max}$. Найденное значение угла α_0 соответствует полному резонансу, при котором параметр связи достигает критического значения $A = 1$.

4.11. Измерить нормированную АЧХ связанных контура при слабой связи между контурами, для чего с помощью поворотного диска установить угол между осями контурных катушек $\alpha > \alpha_0$.

Внимание. При измерении АЧХ следует поддерживать постоянство амплитуды $U_{m\Gamma}$ выходного напряжения генератора, встроенного в осциллограф. Частота и удвоенная амплитуда $2U_{m\Gamma}$ выходного напряжения генератора индицируются в нижней части дисплея осциллографа.

Плавно изменяя частоту генератора, установить её равной резонансной частоте f_0 , при которой амплитуда напряжения на вторичном контуре достигает максимального значения $U_{m2\max}$. Изменяя частоту генератора относительно резонансной частоты контура как в сторону уменьшения, так и в сторону увеличения частоты определить частоты f и амплитуды напряжения U_{m2} , при которых отношение $U_{m2}/U_{m2\max}$ (нормированная АЧХ) принимает значения, указанные в первой строке таблицы 2. Результаты измерений занести в таблицу 2.

Таблица 2 — Результаты измерения АЧХ при слабой связи

$U_{m2K}/U_{m2\max}$	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_{m2} , В													
K													

4.12. По измеренной нормированной АЧХ определить полосу пропускания $\Pi_{0,7}$ связанных контуров на уровне 0,7. Найденное значение полосы пропускания занести в протокол.

4.13. Измерить нормированную АЧХ связанных контуров при критической связи между контурами, для чего с помощью поворотного диска установить угол между осями контурных катушек $\alpha = \alpha_0$. Изменяя частоту генератора в

окрестности резонансной частоты f_0 , как указано в п. 4.11, измерить зависимость амплитуды напряжения U_{m2} на вторичном контуре от частоты. Результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3 — Результаты измерения АЧХ при критической связи

U_{m2K}/U_{m2max}	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_{m2} , В													
K													

4.14. По измеренной нормированной АЧХ определить полосу пропускания $\Pi_{0,7}$ связанных контуров на уровне 0,7. Найденное значение полосы пропускания занести в протокол.

4.15. Измерить АЧХ связанных контура при сильной связи между контурами, для чего с помощью поворотного диска установить угол между осями контурных катушек $\alpha < \alpha_0$. Изменяя частоту генератора в окрестности резонансной частоты f_0 , как указано в п. 4.11, измерить зависимость амплитуды напряжения U_{m2} на вторичном контуре от частоты. Результаты измерений занести в таблицу 4.

Таблица 4 — Результаты измерения АЧХ при сильной связи

U_{m2K}/U_{m2max}	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_{m2} , В													
K													

Поскольку при сильной связи АЧХ связанных контуров приобретают вид «двугорбой» кривой, один максимум которой расположены на частоте меньше резонансной $f_1 < f_0$, а другой — на частоте больше резонансной $f_2 < f_0$, то, плавно перестраивая генератор в окрестности резонансной частоты f'_0 , определить частоты f_1 и f_2 этих максимумов и их значения. Найденные значения частот занести в протокол.

4.16. По измеренной нормированной АЧХ определить полосу пропускания $\Pi_{0,7}$ связанных контуров на уровне 0,7. Найденное значение полосы пропускания занести в протокол.

4.17. Представить протокол лабораторной работа на проверку преподавателю. После проверки выключить питание осциллографа и разобрать лабораторную установку.

5. Содержание отчёта

5.1. Отчет должен содержать:

- титульный лист (см. Приложение А);
- цель работы;
- схему лабораторной установки;
- краткое описание выполненных экспериментов и расчётов, таблицы с результатами экспериментальных измерений и расчётные формулы;
- выводы по работе.

5.2. Построить зависимость напряжения на вторичном контуре U_2 угла поворота α оси вторичного контура относительно оси первичного контура.

5.3. В одной системе координат построить графики экспериментально измеренных нормированных АЧХ связанных контуров при слабой, критической и сильной связи между контурами. При построении АЧХ связанных контуров при сильной связи учесть наличие двух максимумов АЧХ, вызывающих её «двугорбый» вид.

5.4. Привести в отчёте значения полосы пропускания связанных контуров, измеренные при слабой, критической и сильной связи между контурами.

5.5. Сделать выводы о степени совпадения экспериментальных и теоретических результатов, объяснить причины несовпадения.

6. Контрольные вопросы

6.1. Какая электрическая цепь называется связанными колебательными контурами?

6.2. Какие бывают виды связи между контурами?

6.3. Дайте определения коэффициента связи между контурами и поясните, что он характеризует и какие может принимать значения.

6.4. При каких условиях возникает первый частный резонанс?

6.5. Каковы условия возникновения второго частного резонанса?

6.6. Какой резонанс называется сложным, а какой — полным?

6.7. Настройка на какой из резонансов связанных контуров является более предпочтительной и почему?

6.8. Дайте определение вносимого сопротивления.

6.9. Как влияет параметр связи на форму АЧХ связанных контуров?

6.10. Почему при сильной связи АЧХ связанных контуров имеет «двугорбый» вид?

6.11. От каких факторов зависит полоса пропускания связанных контуров?

6.12. Какие преимущества обеспечивает цепь в виде двух связанных колебательных контуров по сравнению с одиночным контуром?

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 ДВУХ СВЯЗАННЫХ КОЛЕБАТЕЛЬНЫХ КОНТУРОВ

*Учебно-методическое пособие
по выполнению лабораторной работы*

*Составители: **Зиборов** Сергей Родионович*

В авторской редакции

Изд. № 300/19. Объем 1 п.л.
РИИЦМ ФГАОУ ВО «Севастопольский государственный университет»