

Приложение

к Рабочей программе по специальности
11.02.06 Техническая эксплуатация
транспортного радиоэлектронного
оборудования (по видам транспорта)

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

**по выполнению лабораторных и практических работ
учебной дисциплины**

ОП.08 РАДИОТЕХНИЧЕСКИЕ ЦЕПИ И СИГНАЛЫ

РАССМОТРЕНО

на заседании методического совета
Протокол № 1 от «21» 09 2023 г.

СОГЛАСОВАНО

Протокол № 1 от « 31» 08 2023г.
Председатель ЦМК 11.02.06 Техническая эксплуатация транспортного радиоэлектронного оборудования (по видам транспорта)

_____/Ю.А. Солдатенко/

УТВЕРЖДАЮ

Заместитель директора по учебной работе

_____/С.А. Крижановский/

Автор (составитель):

Е.Г.Кузнецов – преподаватель высшей квалификационной категории
филиала СамГУПС в г. Саратове

Введение

Методические указания разработаны в соответствии с рекомендациями по разработке методических указаний для обучающихся заочной формы обучения образовательных организаций среднего профессионального образования (письмо Минобразования от 25 августа 1998 г. № 12-52-127 ин/12-23) и предназначены для обучающихся заочной формы обучения по специальности 11.02.06 Техническая эксплуатация транспортного радиоэлектронного оборудования (по видам транспорта) при освоении программы учебной дисциплины ОП. 08. *Радиотехнические цепи и сигналы*.

Методические указания предназначены также преподавателям для организации учебного процесса по дисциплине в целом, подготовке и проведению лабораторных работ и практических занятий.

Изучение дисциплины ОП. 08. *Радиотехнические цепи и сигналы* базируется на знании дисциплин ЕН. 01. Прикладная математика, ОП.03. Теория электрических цепей, ОП. 04. Теория электросвязи, является базовой для овладения другими дисциплинами и профессиональными модулями и служит основой для формирования профессиональных компетенций при подготовке современного техника в области транспортной радиоэлектронной аппаратуры. Ее целью является изучение закономерностей, связанных с передачей сигналов по каналам связи, обработкой и преобразованием информации в радиотехнических цепях.

В результате изучения дисциплины обучающийся должен
уметь:

1. использовать характеристики радиотехнических цепей для анализа их воздействия на сигналы;
2. использовать резонансные свойства параллельного и последовательного колебательных контуров;
3. настраивать системы связанных контуров;

4.рассчитывать электрические фильтры;

знать:

1. физические основы радиосвязи;
2. структурную схему канала связи на транспорте;
3. характеристики и классификацию радиотехнических цепей;
4. основные типы радиосигналов, их особенности и применение в транспортном радиоэлектронном оборудовании.

Для оказания помощи обучающимся в организации их самостоятельной работы по изучению учебного материала после содержания каждой темы приводятся методические указания и даны вопросы для самоконтроля.

В целях закрепления теоретических знаний и приобретения профессиональных компетенций примерной программой учебной дисциплины предусмотрено выполнение 5 лабораторных работ и 7 практических занятий. Примерный перечень лабораторных работ и практических занятий приведен в методических указаниях и носит рекомендательный характер.

Список практических работ

Практическая работа № 1. «Построение результирующей кривой формы сложного сигнала по заданному числу его гармонических составляющих».

Практическая работа № 2. «Расчет полного сопротивления реактивного многоэлементного двухполюсника».

Практическая работа № 3. «Расчет характеристического сопротивления реактивного четырехполюсника».

Практическая работа № 4. «Расчет характеристической постоянной передачи четырехполюсника».

Практическая работа № 5. «Расчет фильтров НЧ и ВЧ типа».

Практическая работа № 6. «Исследование фильтров типа НЧ и ВЧ»

Практическая работа № 7. «Разработка фильтра высоких частот Чебышева».

Список лабораторных работ

Лабораторная работа № 1 «Исследование свободных колебаний в одиночном контуре».

Лабораторная работа № 2 «Исследование вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре».

Лабораторная работа № 3 «Исследование вынужденных колебаний в параллельном колебательном контуре».

Лабораторная работа № 4 «Исследование характеристик связанной колебательной системы».

Лабораторная работа № 5 «Настройка системы из двух связанных контуров».

Практическая работа № 1

Тема: «Построение результирующей кривой формы сложного сигнала по заданному числу его гармонических составляющих».

Цель: Изучение взаимосвязи структуры сигнала и его спектра; научиться строить временную диаграмму.

Ход работы:

1. Выписать данные по варианту:

$n =$ (число гармоник)

$U_0 =$ (постоянная составляющая)

$U_{m1} =$ (амплитуда первой гармоники)

$U_{m2} =$ (амплитуда второй гармоники)

$U_{m3} =$ (амплитуда третьей гармоники)

$\varphi_1 =$ (фазовый сдвиг первой гармоники)

$\varphi_2 =$ (фазовый сдвиг второй гармоники)

$\varphi_3 =$ (фазовый сдвиг третьей гармоники)

$f_1 =$

Вар-нт	n	f_1	U_0	U_{m1}	U_{m2}	U_{m3}	φ_1	φ_2	φ_3
1	3	3	2	10	3	1	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
2	3	2	3	9	2	2	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0
3	3	4	4	3	4	5	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
4	3	5	5	13	5	3	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0
5	3	6	6	6	1	1	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
6	3	7	2	10	4	3	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0
7	3	3	1	14	3	5	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$

Вар-нт	n	f_1	U_0	U_{m1}	U_{m2}	U_{m3}	φ_1	φ_2	φ_3
8	3	3	3	8	4	1	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
9	3	2	4	9	5	1	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0
10	3	4	5	7	4	2	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$

11	3	5	8	7	3	2	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
12	3	6	4	11	6	3	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
13	3	7	3	8	5	5	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
14	3	2	6	10	4	1	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0

Вар-нт	n	f_1	U_0	U_{m1}	U_{m2}	U_{m3}	φ_1	φ_2	φ_3
15	3	3	3	12	3	5	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
16	3	2	2	9	3	1	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
17	3	1	4	10	3	1	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
18	3	4	2	10	5	2	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0
19	3	3	4	8	3	6	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
20	3	4	6	7	7	3	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
21	3	2	5	10	7	2	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0

Вар-нт	n	f_1	U_0	U_{m1}	U_{m2}	U_{m3}	φ_1	φ_2	φ_3
22	3	2	7	4	3	1	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
23	3	3	3	3	2	1	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
24	3	4	2	6	4	1	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
25	3	5	1	10	7	3	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0
26	3	6	4	9	8	5	0	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$
27	3	3	1	3	4	5	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0
28	3	3	2	10	3	5	$\frac{\pi}{4}$	0	$\frac{\pi}{4}$
29	3	5	7	13	4	6	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	0
30	3	3	5	8	3	2	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$	$\frac{\pi}{4}$

2. Рассчитать по формулам три гармонические составляющие по

времени: $t = \frac{1T}{10}$, $t = \frac{2T}{10}$, $t = \frac{3T}{10}$ $t = \frac{10T}{10}$

$$U(t) = U_0 + U_1(t) + U_2(t) + U_3(t)$$

$$U_1(t) = U_{m1} \times \sin(1 \cdot 2\pi f_0 \cdot t + \varphi_1)$$

$$U_2(t) = U_{m2} \times \sin(2 \cdot 2\pi f_0 \cdot t + \varphi_2)$$

$$U_3(t) = U_{m3} \times \sin(3 \cdot 2\pi f_0 \cdot t + \varphi_3)$$

$$T_1 = 1/f_1$$

3. Заполнить таблицу и вычертить на миллиметровке А4 временную диаграмму.

t	0	$\frac{1T}{10}$	$\frac{2T}{10}$	$\frac{3T}{10}$	$\frac{4T}{10}$	$\frac{5T}{10}$	$\frac{6T}{10}$	$\frac{7T}{10}$	$\frac{8T}{10}$	$\frac{9T}{10}$	$\frac{10T}{10}$
U_0											
$U_1(t)$											
$U_2(t)$											
$U_3(t)$											
$U(t)$											

4. Сделать выводы по работе.

Практическая работа №2

Тема: «Расчет полного сопротивления реактивного многоэлементного двухполюсника».

Цель: Произвести необходимые расчеты для нахождения реактивного многоэлементного двухполюсника.

Ход работы:

1. Определите резонансные частоты трехэлементного двухполюсника (рис. 12) при заданных значениях индуктивностей и емкостей.
2. Не соблюдая масштаба, постройте зависимость полного комплексного сопротивления от частоты. Объясните принцип построения графика. Исходные данные и номера задач, рисунков приведены в таблице 9.

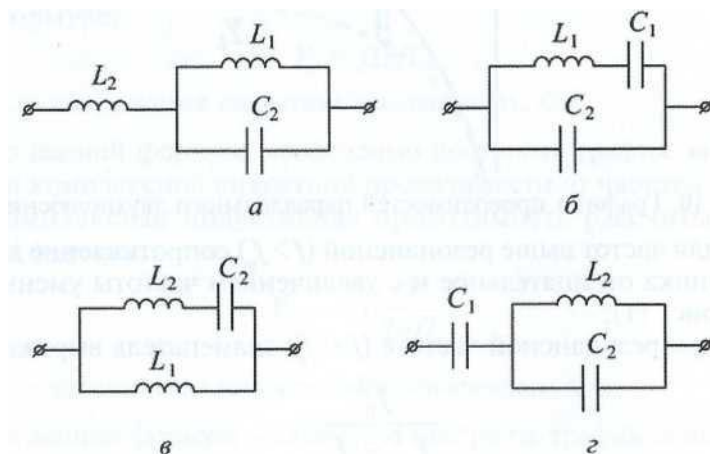


Рис. 12. Схемы трехэлементных двухполюсников

Методические указания к решению задач

Резонансные частоты к схемам трехэлементных двухполюсников определяются по формулам, представленным в таблице 10.

Таблица 9

Параметры двухполюсника	Исходные данные									
	Номер задачи									
	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40
	Номер рисунка									
	12, а	12, б	12, в	12, г	12, а	12, б	12, в	12, г	12, а	12, б
L_1 , мГн	5	7	12	—	6	4	10	—	8	9
L_2 , мГн	2	—	8	10	12	—	8	7	5	—
C_1 , мкФ	0,2	0,4	—	0,8	0,5	0,6	—	0,2	0,5	0,4
C_2 , мкФ	—	0,2	0,5	0,6	—	0,8	0,2	0,4	—	0,5

Таблица 10

Формулы резонансных частот к схемам		
Номер рисунка	Формулы резонансных частот	
12, а	$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$	$\omega_2 = \sqrt{\frac{L_1 + L_2}{L_1 L_2 C_1}}$
12, б	$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$	$\omega_2 = \sqrt{\frac{C_2 + C_1}{C_2 C_1 L_1}}$
12, в	$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{C_2 (L_1 + L_2)}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$
12, г	$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_2 (C_1 + C_2)}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{L_2 C_2}}$

- 1) Общие правила построения частотной зависимости реактивного сопротивления:
- 2) для любой схемы двухполюсника из числа приведенных на рисунке 12 число резонансов схемы на единицу меньше числа ее элементов;
- 3) резонансы напряжений и токов при увеличении частоты чередуются

(то есть наступают по очереди). В цепи не могут наступить один за другим два одностипных резонанса подряд (например, два резонанса напряжений или два резонанса токов);

4) если между зажимами схемы двухполюсника имеется путь постоянному току (от одного зажима до другого), то при увеличении частоты от нулевого значения первым наступит резонанс токов. Если же пути постоянному току нет, то первым наступает резонанс напряжений;

5) при увеличении частоты величина реактивного сопротивления всегда возрастает.

Практическая работа № 3-4

Тема: Расчет характеристического сопротивления реактивного четырехполюсника. Расчет характеристической постоянной передачи четырехполюсника.

Цель: Произвести расчет характеристического сопротивления реактивного четырехполюсника и рассчитать характеристическую постоянную передачи.

Ход работы:

Для заданного типа симметричного четырехполюсника (рис. 17) вычислите постоянную передачи g и характеристическое сопротивление Z_c при

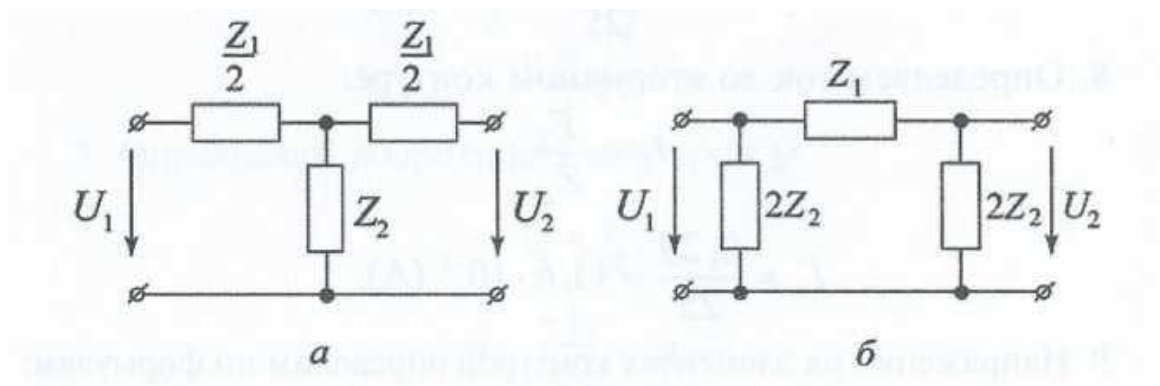


Рис. 17. Схемы симметричных четырехполюсников: а – Т-образный; б – П-образный

заданных сопротивлений Z_1 и Z_2 . Составьте систему уравнений передачи симметричного четырехполюсника. Тип четырехполюсника и значения Z_1 и Z_2 , приведены в таблице 13.

Таблица 13

Исходные данные										
Сопротивле- ния четырёхпо- люсника	Номер задачи									
	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70
	Тип четырехполюсника									
	П-образный	Т-образный	П-образный	Т-образный	П-образный	Т-образный	П-образный	Т-образный	П-образный	Т-образный
Z_1 , Ом	1,0	3,0	4,0	7,0	2,5	7,0	3,0	2,6	9,0	8,0
Z_2 , Ом	0,3	0,2	0,5	0,8	1,2	0,6	0,3	1,2	0,5	0,8

Методические указания к решению

Постоянная передачи для обоих видов четырехполюсников определяется по формуле:

$$g = \ln(A + \sqrt{A_{12}A_{21}}).$$

Примечание: система уравнений, связывающая величины входных и выходных токов и напряжений, называется системой уравнений четырехполюсника с А-параметрами, А -параметры иногда обозначают другими буквами: $A_{11} = A$; $A_{12} = B$; $A_{21} = C$; $A_{22} = D$. Для симметричного

четырехполюсника $A_{11} = A_{22} = A$

В дальнейшем будем использовать обозначения $A_{11}, A_{12}, A_{21}, A_{22}$

Система уравнений имеет вид:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= A_{11}U_2 + A_{12}I_2 \\ I_1 &= A_{21}U_2 + A_{22}I_2 \end{aligned} \right\},$$

где U_1, I_1 – напряжение и ток на входе четырехполюсника;
 U_2, I_2 – напряжение и ток на выходе четырехполюсника.

Формулы для расчета характеристического сопротивления Z_c четырехполюсников и их А-параметров приведены в таблице 14

Таблица 14

Параметры четырехполюсников				
Тип четырехполюсника	Формула характеристического сопротивления	Формулы параметров четырехполюсника		
П-образный	$Z_c = Z_{\Pi} = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{1 + \frac{Z_1}{4Z_2}}}$	$A_{12} = Z_1$	$A_{21} = \frac{1}{Z_2} \left(1 + \frac{Z_1}{4Z_2}\right)$	$A_{11} = A_{22} = A = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}$
Т-образный	$Z_c = Z_T = \sqrt{Z_1 Z_2 \left(1 + \frac{Z_1}{4Z_2}\right)}$	$A_{12} = Z_1 \left(1 + \frac{Z_1}{4Z_2}\right)$	$A_{21} = \frac{1}{Z_2}$	$A_{11} = A_{22} = A = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}$

Пример.

Для П-образного симметричного четырехполюсника вычислите постоянную передачи g и характеристическое сопротивление Z_c при сопротивлениях $Z_1 = 1,2$ Ом и $Z_2 = 0,4$ Ом. Составьте систему уравнений передачи симметричного четырехполюсника.

Решение.

1. Определяем А-параметры П-образного симметричного четырехполюсника:

$$\begin{aligned} A_{11} &= A_{22} = A = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2} \\ A_{11} &= A_{22} = A = 1 + \frac{1,2}{2 \cdot 0,4} = 2,5; \\ A_{12} &= Z_1; \\ A_{12} &= 1,2 \text{ (Ом)}; \end{aligned}$$

$$A_{21} = \frac{1}{Z_2} \left(1 + \frac{Z_1}{4Z_2} \right);$$

$$A_{21} = \frac{1}{0,4} \left(1 + \frac{1,2}{4 \cdot 0,4} \right) = 4,375.$$

2. Составляем уравнение передачи четырехполюсника:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= 2,5U_2 + 1,2I_2 \\ I_1 &= 4,375U_2 + 2,5I_2 \end{aligned} \right\}.$$

3. Вычисляем характеристическое сопротивление четырехполюсника Z_c

$$Z_c = Z_{\Pi} = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{1 + \frac{Z_1}{4Z_2}}}$$

$$Z_c = Z_{\Pi} = \sqrt{\frac{1,2 \cdot 0,4}{1 + \frac{1,2}{4 \cdot 0,4}}} \approx 0,52 \text{ (Ом)}.$$

4. Вычисляем постоянную передачи g

$$g = \ln(A + \sqrt{A_{12}A_{21}});$$

$$g = \ln(4 + \sqrt{1,2 \cdot 4,375}) = 1,84.$$

Практическая работа №5

Тема: Расчет фильтров НЧ и ВЧ типа

Цель: рассчитать основные параметры фильтров НЧ и ВЧ двух типов «к» и «т».

Ход работы:

1. Для заданного фильтра «к» вычислите величины индуктивности L и емкости C , если предельная частота равна f_c , а сопротивление нагрузки R .

Таблица 15

Исходные данные

Номер задачи	Тип фильтра	Вид схемы	f_c , кГц	R , Ом	f , кГц
1	2	3	4	5	6
71	ФНЧ	П-образный	12	500	$0,5 f_c$
72	ФВЧ	П-образный	11	750	$1,5 f_c$

Окончание таблицы 15

1	2	3	4	5	6
73	ФНЧ	Т-образный	14	650	$0,25 f_c$
74	ФВЧ	Т-образный	15	600	$1,25 f_c$
75	ФНЧ	П-образный	10	800	$0,75 f_c$
76	ФВЧ	П-образный	10	600	$1,75 f_c$
77	ФНЧ	Т-образный	12	800	$0,5 f_c$
78	ФВЧ	Т-образный	11	500	$1,5 f_c$
79	ФНЧ	П-образный	14	750	$0,25 f_c$
80	ФВЧ	Т-образный	15	650	$1,25 f_c$

2. Определите характеристическое сопротивление фильтра на заданной частоте F . Тип фильтра и значения f_c , R и f приведены в таблице 15.
3. Схемы ФНЧ типа «к» приведены на рисунке 18, схемы ФВЧ — на рисунке 19.

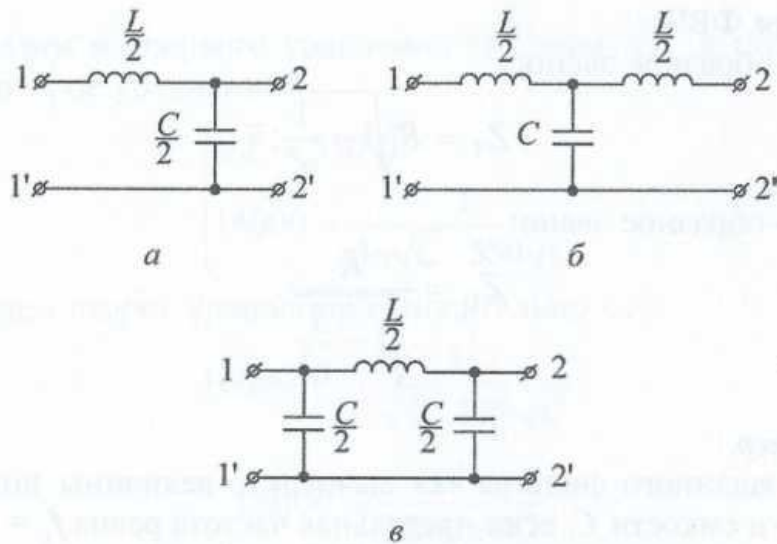


Рис. 18. Схемы фильтров нижних частот типа «к»:
a – Г-образное полужвено; *б* – Т-образное звено; *в* – П-образное звено

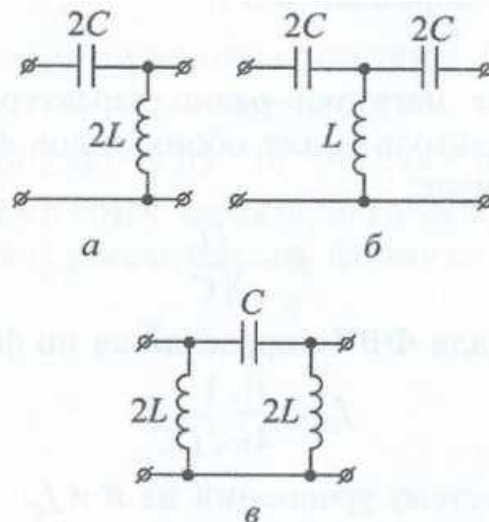


Рис. 19. Схемы фильтров верхних частот типа «к»:
a – Г-образное полужвено; *б* – Т-образное звено; *в* – П-образное звено

Методические указания к решению

Сопротивление нагрузки равно характеристическому сопротивлению

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Частота среза для ФНЧ определяется по формуле:

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}.$$

Частота среза для ФВЧ определяется по формуле:

$$f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}.$$

Далее необходимо составить систему уравнений из R и f_c и решить ее относительно L и C .

Характеристическое сопротивление на частоте f рассчитывается по формуле:

— для ФНЧ:
Т-образное звено:

$$Z_T = R\sqrt{1 - \eta^2};$$

П-образное звено:

$$Z_{\Pi} = \frac{R}{\sqrt{1 - \frac{1}{\eta^2}}}.$$

где $\eta = \frac{f}{f_c}$ — безразмерная величина, вводится для удобства расчетов;

— для ФВЧ:
Т-образное звено:

$$Z_T = R\sqrt{1 - \frac{1}{\eta^2}};$$

П-образное звено:

$$Z_{\Pi} = \frac{R}{\sqrt{1 - \frac{1}{\eta^2}}}.$$

Пример.

Для заданного фильтра «к» вычислите величины индуктивности L и емкости C , если предельная частота равна $f_c = 16$ кГц, а сопротивление нагрузки $R = 550$ Ом. Определите характеристическое сопротивление фильтра на заданной частоте $f = 1,4f_c$. Тип фильтра - П-образный ФВЧ.

Решение.

Сопротивление нагрузки равно характеристическому сопротивлению:

$$R = \sqrt{\frac{L}{C}}.$$

Частота среза для ФВЧ определяется по формуле:

$$f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}.$$

Составляем систему уравнений из R и f_c

$$\begin{cases} R = \sqrt{\frac{L}{C}} \\ f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}} \end{cases}$$
$$\begin{cases} 550 = \sqrt{\frac{L}{C}} \\ 16000 = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}} \end{cases}.$$

Выразим из первого уравнения системы $\sqrt{L}$ и подставим его во второе уравнение:

$$\begin{cases} \sqrt{L} = 550\sqrt{C} \\ 16000 = \frac{1}{4\pi\sqrt{C} \cdot 550\sqrt{C}} \end{cases}.$$

Решаем второе уравнение относительно C:

$$16000 = \frac{1}{4\pi\sqrt{C} \cdot 550\sqrt{C}};$$
$$16000 = \frac{1}{2200\pi \cdot C};$$
$$C = \frac{1}{2200 \cdot 16000 \cdot \pi} = \frac{1}{110528000} \approx 9,05 \cdot 10^{-9} \text{ (Ф)}.$$

Выразим из первого уравнения системы L

$$L = 302500 \cdot C;$$
$$L = 302500 \cdot 9,05 \cdot 10^{-9} = 2,74 \cdot 10^{-3} \text{ (Гн)}.$$

Для П-образного ФВЧ характеристическое сопротивление на частоте $f = 1,4 f_c$ рассчитаем по формуле:

$$Z_{\Pi} = \frac{R}{\sqrt{1 - \frac{1}{\eta^2}}},$$

где $\eta = \frac{f}{f_c}$;

$$\eta = \frac{1,4 f_c}{f_c} = 1,4;$$
$$Z_{\Pi} = \frac{550}{\sqrt{1 - \frac{1}{1,4^2}}} \approx 785,71 \text{ (Ом)}.$$

Практическая работа № 6

Тема: Исследование фильтров типа НЧ и ВЧ

Цель: Научить измерять и строить частотные характеристики исследуемых фильтров, определять их частоты среза, оценивать влияние сопротивления нагрузки на частотные характеристики, вычислять затухание фильтров, сравнивать экспериментальные и расчетные параметры.

Ход работы

1 Исследование ФНЧ

1.1 Ознакомиться с исходными данными своего варианта, приведёнными в таблице 1.

1.2 В соответствии с исходными данными своего варианта произвести расчёт параметров элементов Т-образного ФНЧ (см. рисунок 4) согласно следующим формулам:

$$C = 2 / \omega_{cp} R_n = 1 / \pi f_{cp} R_n; \quad L = 2 R_n / \omega_{cp} = R_n / \pi f_{cp}; \quad (1)$$

1.3 Открыть программу EWB 5.12 и схему ФНЧ (см. рисунок 4). Зарисовать схему ФНЧ с учетом рассчитанных параметров.

1.4 Установить номиналы электрорадиоэлементов в соответствии с расчетами и таблицей 1, а действующее значение выходного переменного напряжения генератора (входного переменного напряжения фильтра $U_{вх}$), равным 1В.

Таблица 1

Вариант			1	2	3	4	5	6	7	8
Частота среза $f_{ср}$, кГц			1	2	3	4	5	6	7	8
Сопротивление нагрузки R_H , кОм			0,1	0,2	0,5	0,7	1	2	2,5	3
9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
$f_{ср}$	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18
R_H	5	10	12	15	20	22	25	30	33	36
20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$f_{ср}$	20	2	22	23	24	25	26	27	28	29
R_H	40	45	48	50	56	60	68	1.5	2.2	4.7

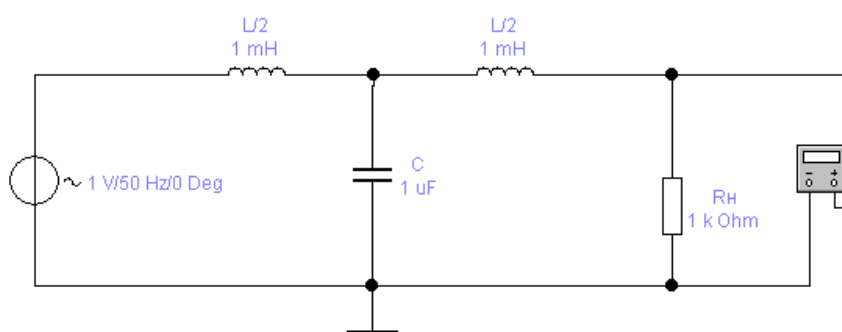


Рисунок 4 – Т-образный ФНЧ

1.5 Изменяя частоту генератора (частоту входного сигнала) с помощью мультиметра произвести измерения действующих значений выходного переменного напряжения фильтра $U_{вых}$ при различных частотах f входного сигнала. Частоту изменять так, чтобы зафиксировать прозрачную и непрозрачную полосы фильтра. Данные измерений занести в таблицу 2. Рассчитать значения модуля коэффициента передачи ФНЧ согласно выражению:

$$K = U_{вых} / U_{вх}. \quad (2)$$

Таблица 2

f , кГц								f_{cp}				
$U_{вых}$, В												
K												

1.6 По данным таблицы 2 построить АЧХ ФНЧ

2 Исследование ФВЧ.

2.1 В соответствии с исходными данными своего варианта (см. таблицу 1) произвести расчёт параметров элементов Т-образного ФВЧ (см. рисунок 5) согласно следующим формулам:

$$L = R_i / 2\omega_{\tilde{n}\tilde{o}} = R_i / 4\pi f_{\tilde{n}\tilde{o}}; C = 1 / 2\omega_{\tilde{n}\tilde{o}} R_i = 1 / 4\pi f_{\tilde{n}\tilde{o}} R_i. (3)$$

2.2 Открыть схему ФВЧ в EWB 5.12, (см. рисунок 5), и зарисовать ее с учетом рассчитанных параметров.

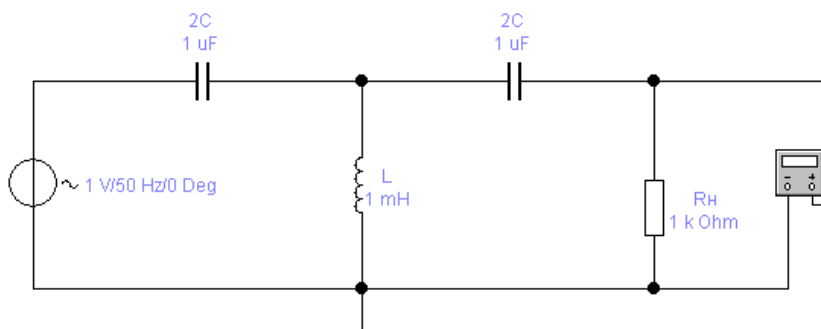


Рисунок 5 – Т-образный ФВЧ

2.3 Повторить пункты 1.4, 1.5 для ФВЧ.
Результаты измерений занести в таблицу 3.

Таблица 3

f , кГц					f_{cp}							
$U_{вых}$, В												
K												

2.4 По данным таблицы 3 построить АЧХ

Практическая работа № 7.

Тема:Разработка фильтра высоких частот Чебышева

Цель:Произвести расчет ФВЧ, предназначенного для аппаратуры уплотнения специального типа.

Ход работы:

1. Выписать исходные данные представляющие собой требования к частотной зависимости затухания ФВЧ Чебышева из таблицы 1:

Граница полосы пропускания фильтра: $f_0 =$ кГц;

Граница полосы задержания фильтра: $f_k =$ кГц;

Неравномерность характеристики затухания в полосе пропускания: $\Delta a =$ дБ;

Гарантированное затухание в полосе задержки: $a_0 =$ Нп;

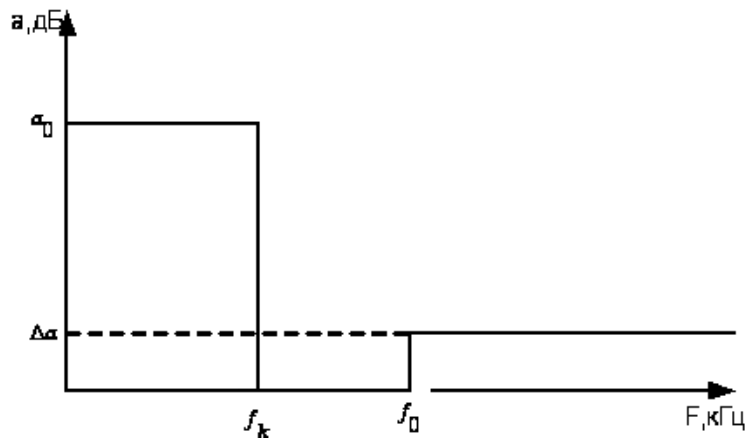
Сопротивление генератора и нагрузки: $R_{\Gamma} = R_n =$ Ом;

Таблица 1

№ варианта	f_0 , кГц	f_k , кГц	Δa , дБ	a_0 , Нп	$R_{\Gamma} = R_n$, Ом
0	83	44,86	0,17	2,65	350
1	65	35,36	0,2	2,26	350
2	94	45,76	0,18	2,67	300
3	84	50,02	0,16	2,2	290
4	78	43,77	0,175	2,56	300
5	79	41,05	0,167	2,69	350
6	80	40,00	0,185	2,35	320
7	82	45,33	0,17	2,56	300
8	87	44,86	0,14	1,9	350
9	75	52,86	0,15	2,0	290
10	90	51,66	0,12	2,43	320

Методические указания к решению

1. Расчёт ФВЧ производится на основе расчета ФНЧ-прототипа, для которого производится пересчет частот, при этом порядок расчета следующий:



2. Пересчет требований, сформулированных к ФВЧ, в требования к ФНЧ-прототипу и расчет ФНЧ-прототипа, пересчет параметров элементов ФНЧ-прототипа в параметры ФВЧ.
 - 2.1 Выбирается схема фильтра и определяется число элементов в ней;
 - 2.2 Изображается схема фильтра с параметрами элементов по ГОСТ и производится контрольный расчет затухания фильтра.
 - 2.3 Зная частоты f_0 и f_k , найдем граничные частоты полосы пропускания и полосы задерживания ФНЧ-прототипа:

$$f_{кП} = \frac{f_0^2}{f_k} = \frac{83^2}{44,86} = 154 \text{ кГц}$$

$$f_{0П} = f_0 = 83 \text{ кГц}$$

- 2.4 По найденным граничным частотам $f_{0П}$ и $f_{кП}$, а также заданным Δa и a_0 рассчитаем ФНЧ с характеристиками Чебышева.

$$\hat{f}_{кП} = \frac{f_{кП}}{f_{0П}} = \frac{154 \text{ кГц}}{83 \text{ кГц}} = 1,85$$

2.5 Минимально возможный порядок передаточной функции рассчитывается по формуле с учетом нормированной частоты полосы задержания ФНЧ-прототипа:

$$n_{\text{ч}} \geq \frac{6 + a_0 - 10 \lg[10^{0,1 \Delta a} - 1]}{20 \lg(\hat{f}_k + \sqrt{\hat{f}_k^2 - 1})}$$

Подставляя численные значения в (1) получаем:

$$n_{\text{ч}} \geq \frac{6 + 23 - 10 \lg[10^{0,1 \cdot 0,17} - 1]}{20 \lg(1,85 + \sqrt{1,85^2 - 1})} = 4,04$$

Так как, в результате расчетов, минимальный порядок оказался равным 4,04, то полученное значение округляется до большего ближайшего целого числа, т.е. $n_{\text{ч}} = 5$.

2.6 Выберем схему ФНЧ-прототипа, которая определяется на основании принятого значения $n_{\text{ч}}$. Схема ФНЧ-прототипа представлена на рисунке 1.

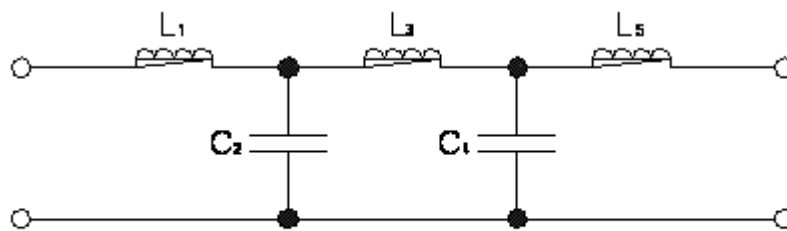


Рис. 1. Схема ФНЧ – прототипа для расчёта

2.7 Выпишем нормированные значения емкостей, индуктивностей, а также значения нулей и полюсов затухания фильтра в зависимости от Δa , a_0 и $f_{\text{кп}}$ из таблицы: $L_1 = 1,144$; $L_3 = 1,972$; $L_5 = 1,144$; $C_2 = 1,372$; $C_4 = 1,372$.

2.8 Рассчитаем истинные значения индуктивностей и емкостей для схемы ФНЧ-прототипа по следующим формулам:

$$C_i = \frac{\tilde{C}_i}{2\pi \cdot f_0 \cdot R_H}$$

$$L_i = \frac{\tilde{L}_i \cdot R_H}{2\pi \cdot f_0}$$

$$C_2 = \frac{\tilde{C}_2}{2\pi \cdot f_0 \cdot R_H} = \frac{1,372}{2 \cdot 3,14 \cdot 83 \cdot 10^3 \cdot 350} = 7520 \text{ пФ}$$

$$L_1 = \frac{\tilde{L}_1 \cdot R_H}{2\pi \cdot f_0} = \frac{1,144 \cdot 350}{2 \cdot 3,14 \cdot 83 \cdot 10^3} = 768 \text{ мкГн}$$

То же самое проделать для всех элементов фильтра.

2.9 Истинные частоты значений нулей и полюсов ослабления с учетом граничной частоты полосы пропускания f_0 рассчитаем по следующим выражениям:

$$f_{0i} = \tilde{f}_{0i} \cdot f_0, (3)$$

Согласно [1] нормированные значения частот нулей ослабления для ФВЧ Чебышева составляют:

$$\tilde{f}_{02} = 0,34549, \tilde{f}_{04} = 0,90541.$$

Тогда согласно выражений (3) истинные значения равны:

$$f_{02} = \tilde{f}_{02} \cdot f_0 = 0,34549 \cdot 83000 = 28,675 \text{ кГц};$$

$$f_{04} = \tilde{f}_{04} \cdot f_0 = 0,90541 \cdot 83000 = 75,074 \text{ кГц};$$

2.10 При переходе от схемы ФНЧ-прототипа к ФВЧ необходимо в схеме ФНЧ индуктивности L_i преобразовать в емкости C_i , а емкости C_i в индуктивности L_i по следующим формулам:

$$C_i' = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L_i}$$

$$L_i' = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot C_i}$$

$$C_1' = \frac{1}{4\pi^2 \cdot f_0^2 \cdot L_1} = \frac{1}{4\pi^2 \cdot (83 \cdot 10^3)^2 \cdot 768 \cdot 10^{-6}} = 4,79 \text{ нФ}$$

+ C3, C5, L2, L4 (мкГн)

2.11 Схема ФВЧ пятого порядка в общем случае имеет вид представленный на рисунке 1.3.

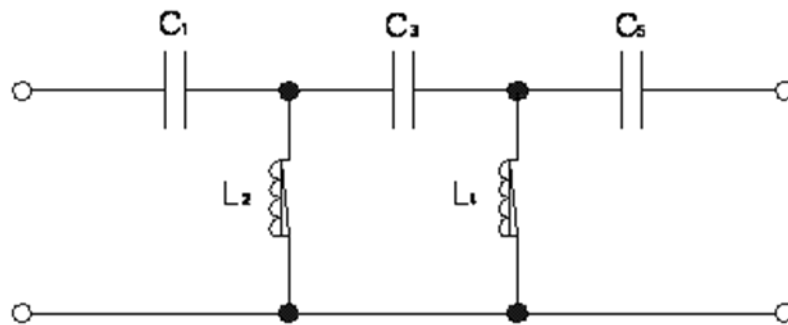


Рис. 2. Схема рассчитанного фильтра высоких частот

2.12 Каждому истинному значению частоты нулей ФНЧ-прототипа $f_{\text{ФНЧ}}$ соответствует частота ФВЧ $f_{\text{ФВЧ}}$. Связь между ними выражается следующей

формулой: $f_{\text{ФВЧ}} = \sqrt{(0,5 \cdot f_{\text{ФНЧ}})^2 + f_0^2} + 0,5 \cdot f_{\text{ФНЧ}}$.

Рассчитаем характерные частоты

$$\text{ФВЧ: } f_{02} = \sqrt{(0,5 \cdot 28,675 \cdot 10^3)^2 + (83 \cdot 10^3)^2} + 0,5 \cdot 28,675 \cdot 10^3 = 98,566 \text{ кГц},$$

$$f_{04} = \sqrt{(0,5 \cdot 75,074 \cdot 10^3)^2 + (83 \cdot 10^3)^2} + 0,5 \cdot 75,074 \cdot 10^3 = 128,63 \text{ кГц},$$

на основании проведенного расчета частот построим характеристику фильтра высоких частот Чебышева (рис 3).

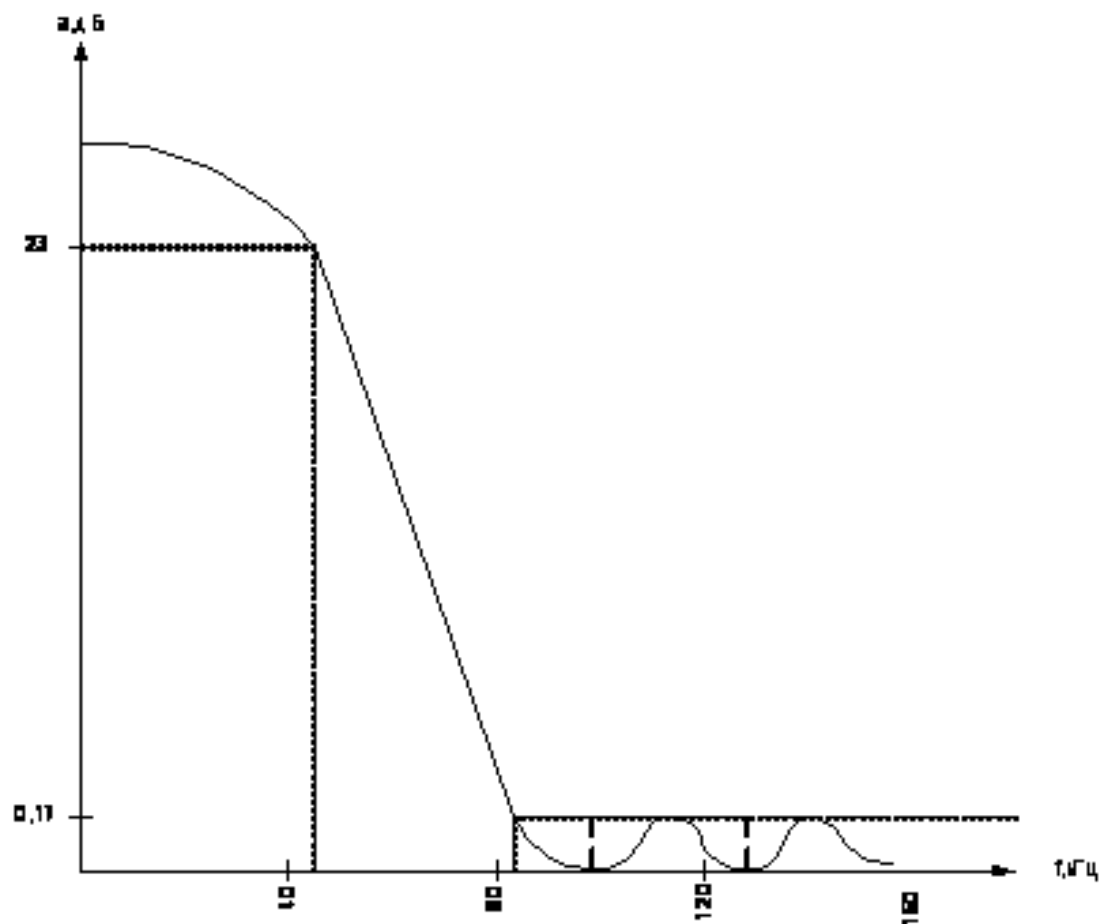


Рис. 3 Характеристика затухания рассчитанного фильтра высоких частот

Общие правила выполнения лабораторных работ

Лабораторные работы по радиотехническим цепям и сигналам выполняются после изучения соответствующих разделов теоретического курса. Учащийся должен заблаговременно подготовиться к лабораторной работе. Хорошая подготовка к лабораторной работе — неперенное условие ее эффективности, так как проведение любого эксперимента имеет смысл только в том случае, если экспериментатор отчетливо представляет себе цель эксперимента и характер ожидаемых результатов.

Выполняемые лабораторные работы служат не только для закрепления ранее изученного теоретического материала, но и для привития учащимся навыков экспериментальных исследований, учат их критически оценивать полученные результаты.

1. Перед выполнением работы в лаборатории необходимо убедиться, что стенд и все приборы выключены, ознакомиться с приборами и аппаратурой, определить их номинальные данные, записать в отчет технические данные используемых приборов.

2. Учащиеся обязаны после окончания сборки схемы, не включая ее, сами проверить правильность соединений, а затем предъявить схему для проверки преподавателю или лаборанту.

Включать схему без разрешения преподавателя категорически запрещается!

3. Прежде чем проводить измерения, необходимо определить диапазон измеряемых величин, цену деления соответствующих шкал и наметить значения, которые будут устанавливаться для независимой переменной. Для плавных, монотонных зависимостей достаточно 5—6 значений независимой переменной, равномерно распределенных по всему диапазону ее изменения. При исследовании зависимостей, имеющие особые

точки (максимум, минимум, перегиб), значения измеряемых величин вблизи особых точек должны быть сняты чаще.

4. Результаты измерений учащийся записывает на специальный бланк и предъявляет его преподавателю для проверки. Каждый учащийся должен иметь свой черновик.

5. Работа считается законченной только после просмотра и утверждения полученных результатов преподавателем. После окончания работы учащийся должен выключить все источники питания и приборы, привести в порядок рабочее место, сдать общественному лаборанту макет, соединительные кабели и перемычки.

6. К следующему занятию на специальном бланке представляется отчет о выполненной лабораторной работе. В нем приводятся:

- а) схемы лабораторной установки;
- б) перечень измерительных приборов с указанием их типа, заводского номера, предела измерений и класса точности;
- в) таблицы результатов измерений;
- г) графики, построенные по результатам измерений;
- д) расчеты требуемых величин;
- е) краткие выводы по работе (объяснение хода кривых, причины отклонения результатов эксперимента от теоретических положений, оценка погрешности и т. д.).

Отчет должен быть выполнен аккуратно. Чертежи и схемы выполняются карандашом и в соответствии с требованиями ЕСКД. Графики выполняются на миллиметровой бумаге с указанием масштабов по осям координат. При пропорциональном масштабе по осям координат деления указываются через 1 см.

Точки, по которым построены графики, должны быть отчетливо видны. Кривые проводятся тонкой плавной линией по лекалу.

Указания по технике безопасности

В лаборатории теории электросвязи все основные лабораторные

работы проводятся на лабораторном стенде "ЛРС-1», на правой боковой панели которого расположены штепсельные розетки, находящиеся под напряжением сети 220 В, независимо от положения главного выключателя стенда. Поэтому крайне необходимо соблюдать следующие правила техники безопасности.

1. Перед началом работы необходимо убедиться, что стенд и все выключатели на выпрямителях и приборах находятся в положении «Выключено».

2. При сборке схемы следует обратить внимание на исправность изоляции соединительных кабелей, целостность перемычек. При обнаружении неисправностей необходимо сообщить об этом преподавателю или лаборанту.

3. Категорически запрещается включать схему без разрешения преподавателя или лаборанта.

4. При всех изменениях в схеме (замене деталей и перемычек, устранении неисправностей) источники питания должны быть отключены. Последующее включение схемы может быть произведено только с разрешения преподавателя.

5. При смене деталей на макете и при изменении положений различных элементов схемы запрещается касаться свободной рукой неизолированных мест шасси, корпусов других приборов и труб центрального отопления.

6. Разбирать схему в конце работы можно только после разрешения преподавателя или лаборанта и после полного выключения "всех источников питания.

7. Учащиеся несут ответственность за происшедшую по их вине порчу лабораторного оборудования. *

8. При обнаружении каких-либо повреждений или неисправностей, а также при появлении дыма, искрения или запаха перегорелой изоляции необходимо немедленно выключить стенд и сообщить об этом

преподавателю или лаборанту.

9. В случае поражения человека электрическим током следует немедленно отключить стенд, и, если отключение напряжения не может быть произведено быстро, нужно, отделить пострадавшего от частей оборудования, находящихся под напряжением. При этом необходимо пользоваться резиновыми перчатками и ковриками, а при их отсутствии можно применить такие подручные средства, как сухая одежда, сухие деревянные элементы и другие изоляторы.

10. При потере пострадавшим сознания и дыхания необходимо освободить его от стесняющей одежды и делать искусственное дыхание до прибытия врача.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 1

Тема: Исследование свободных колебаний в одиночном контуре

Цель работы: Ознакомиться с методикой получения свободных колебаний и наблюдения за ними. Изучить связь параметров контура с характером свободных колебаний.

Краткие теоретические сведения

Эквивалентная схема реального контура (рисунок 1) содержит индуктивность L , ёмкость, C и активное сопротивление r , которое равно сумме активных сопротивлений в индуктивности (r_L) и ёмкости r_C .

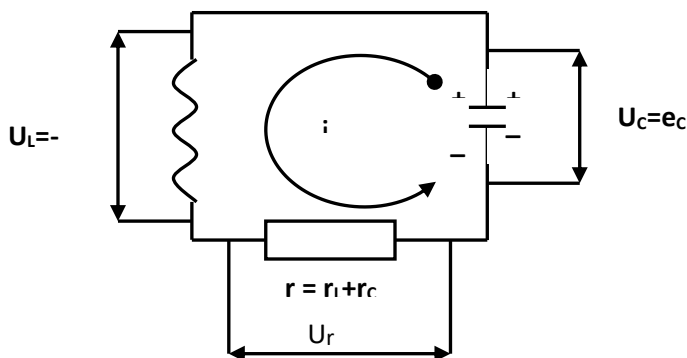


Рисунок 1 – Эквивалентная схема реального колебательного контура

В реальном контуре периодическое преобразование реактивной энергии (электрической в магнитную и обратно) сопровождается потерями на сопротивлении r , вследствие чего амплитуда колебаний уменьшается от периода к периоду или свободные колебания в реальном контуре имеют затухающий характер.

Амплитуда свободных колебаний $I_m(t)$ с течением времени t изменяется по экспоненциальному закону (рисунок 2).

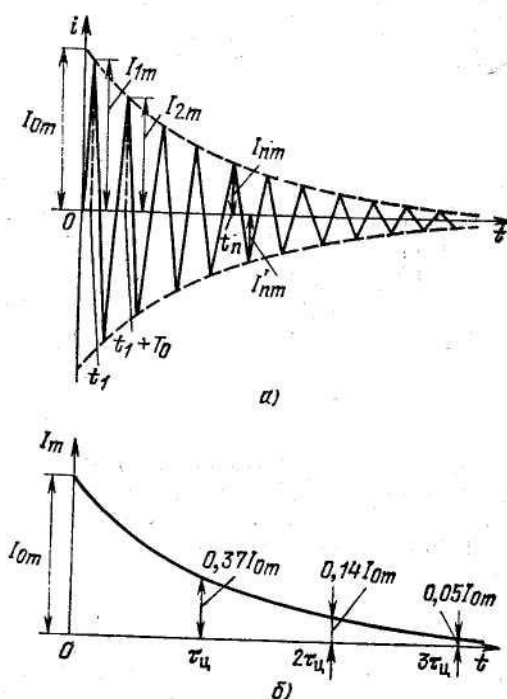


Рисунок 2 – Временные диаграммы мгновенного (а) и амплитудного (б) значений тока в реальном контуре при свободных колебаниях в нем

$$I_m(t) = I_{0m} \times e^{-t/\tau_c}; \quad (1)$$

где I_{0m} – амплитуда тока в начале процесса ($t = 0$);
 τ_c – постоянная времени контура

$$\tau_c = 2L/r; \quad (2)$$

Мгновенное значение тока в контуре.

$$i = I_m(t) \times \sin \omega_0 t = I_{0m} \times e^{-t/\tau} \sin \omega_0 t; \quad (3)$$

где ω_0 – угловая частота свободных колебаний контура.
Мгновенное значение напряжения на индуктивности контура.

$$U_L = U_{0m} \times e^{-t/\tau} \times \sin(\omega_0 t + \varphi); \quad (4)$$

где U_{0m} – начальная амплитуда напряжения;
 φ – сдвиг по фазе между напряжением U_L и током i ($\varphi = \arctg(\omega_0 \tau_{\Pi})$).

С увеличением сопротивления потерь r постоянная времени контура τ_{Π} уменьшается, и амплитуда колебаний I_m убывает быстрее.

Частота свободных колебаний равна

$$\omega_0 = (1/\sqrt{LC}) \times \sqrt{1 - r^2/4\rho^2}, \quad (5)$$

где ρ – характеристическое сопротивление контура.

$$\rho = \sqrt{L/C}. \quad (6)$$

Так как r исчисляется несколькими, а ρ – сотнями Ом, то $r^2/4\rho^2 \ll 1$.
Тогда

$$\omega_0 = 1/\sqrt{LC}. \quad (7)$$

Свободные колебания в контуре возможны только при $r < 2\rho$. В противном случае подкоренное выражение в формуле (5) отрицательное и собственная частота контура ω_0 оказывается мнимой величиной. Физически это означает, что потери в контуре настолько велики, что перезаряд конденсатора становится невозможным и разряд его приобретает аperiодический характер (рисунок 3).

Добротность колебательного контура определяется из выражения

$$Q = \rho/r. \quad (8)$$

Затухание колебаний d определяется из выражения

$$d = \frac{1}{Q}. \quad (9)$$

Реактивные сопротивления индуктивности и ёмкости определяются из выражений

$$x_L = \omega_0 L, \quad x_C = \frac{1}{\omega_0 C}. \quad (10)$$

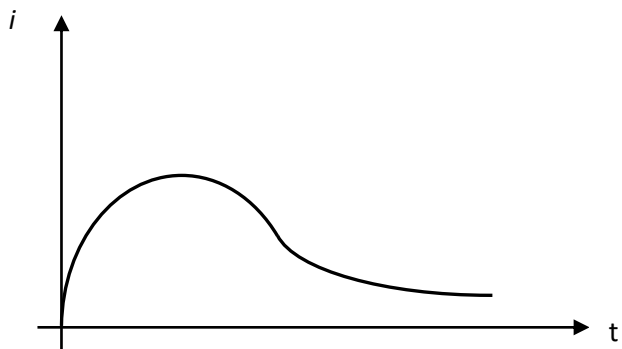


Рисунок 3 – Ток в контуре при аperiodическом разряде конденсатора

Переход от колебательного разряда к аperiodическому совершается при критическом затухании, соответствующему равенству $r = 2\rho$.

Ход работы:

- 2.1. Включить ЭВМ
- 2.2. Запустить программу ElectronicWorkbench 5.12.
- 2.3. Открыть файл схемы

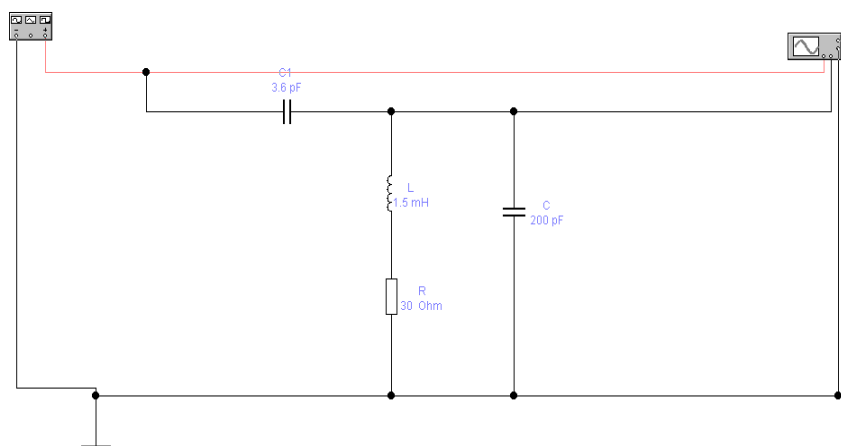


Рисунок 4 – Схема лабораторной установки

Схема лабораторной установки (рисунок 4) представляет собой колебательный контур, параметры L и C которого можно изменять. Сопротивление R – это активное сопротивление катушки индуктивности L (сопротивление потерь колебательного контура). Емкость $C1$ обеспечивает подключение импульсного генератора к колебательному контуру и исключает постоянную составляющую напряжения на контуре. Осциллограф

подключен каналом А (красная линия) к выходу генератора, а каналом В – к колебательному контуру. «Земля» осциллографа и генератора подключена к общей точке схемы.

2.4. Вывести окно осциллографа. Для этого необходимо двойным щелчком левой клавиши мыши нажать на осциллограф, в появившемся окне нажать «Expand» :

2.5. Запустить моделирование на 3-5 секунд с помощью выключателя моделирования. Нажимая одинарным щелчком левой клавиши мыши на стрелки (1) и (2) (рисунок 5) продвинуть получившуюся осциллограмму влево или вправо до тех пор, пока на экране не появятся 2 импульса, между которыми наблюдаются затухающие синусоидальные колебания.

При этом масштаб развёртки по времени осциллографа (Timebase) должен быть установлен равным 0.02ms/div. Развёртка по времени регулируется с помощью стрелок (3), по напряжению (вольт на деление) канала А- стрелками(4), канала В - стрелками(5). Изменение цвета фона осуществляется нажатием на «Reverse».

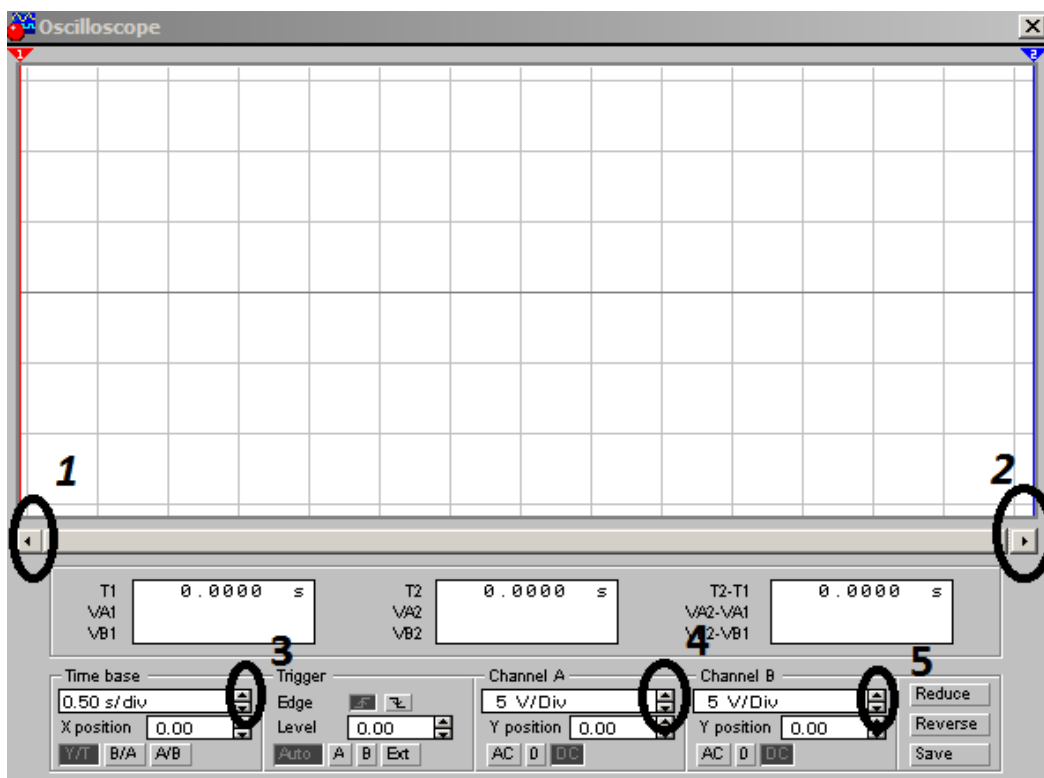


Рисунок – 5 Окно осциллографа

Изменить величину емкости C , прибавив к емкости значение $C' = 3 \text{ пФ} \cdot \text{№варианта}$ (№варианта соответствует № фамилии в списке группы). Рассчитанное значение емкости C необходимо взять за исходное.

2.6. Запустить моделирование на 3-5 секунд с помощью выключателя моделирования. Зарисовать осциллограмму затухающих колебаний на миллиметровой бумаге.

2.7. На полученной осциллограмме измерить две соседние амплитуды ab и cd (см. рисунок 6).

Для этого необходимо *масштаб развёртки по времени* осциллографа (Timebase) уменьшить. Нажать левой клавишей мыши на стрелку (1) (рисунок 7) и удерживая её передвигать вертикальную линию до амплитудного значения колебаний. Точное значение напряжения показывается в окне (2) (рисунок 7).

Вычислить логарифмический декремент затухания колебаний G и добротность Q по формулам $G = (ab - cd) / ab$; $Q = \pi / G$; ($\pi = 3,14$).

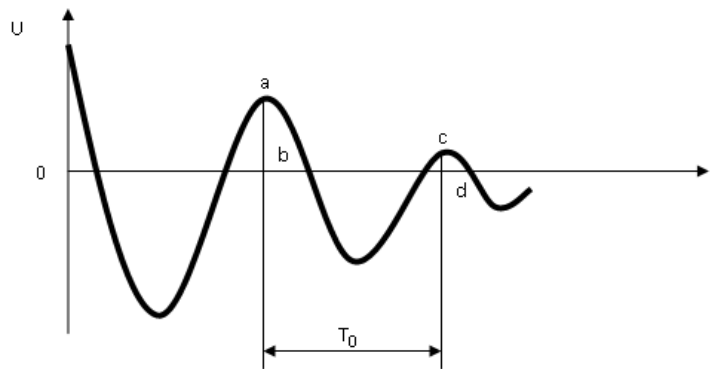


Рисунок 6— Осциллограмма затухающих колебаний

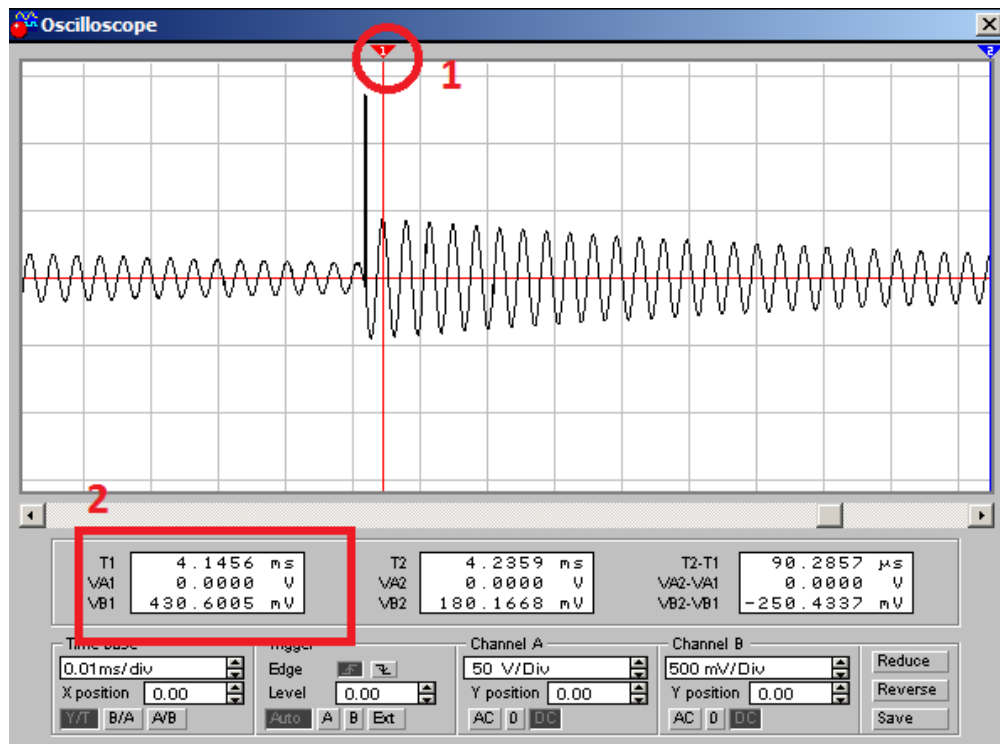


Рисунок 7 – Измерение амплитудных значений

2.8 Записать выражение для полученной осциллограммы напряжения (см. выражение 4).

Определить:

начальную амплитуду колебаний U_{0m} (см. рисунок 3, где ток I_{0m} можно заменить на напряжение U_{0m});

период колебаний T_0 (интервал времени между двумя повторяющимися мгновенными значениями с учётом одинакового знака их изменения (см. рисунок 6).

частоту колебаний $f_0 = 1/T_0$.

угловую частоту $\omega_0 = 2\pi f_0$.

длину волны сводных колебаний $\lambda_0 = c/f_0$, где c – скорость света.

2.9 Используя параметры L , C , R , рассчитать частоту свободных колебаний ω_0 (см. выражение 7), характеристическое сопротивление ρ (см. выражение 6), добротность Q (см. выражение 8), затухание d (см. выражение 9), реактивные сопротивления X_L , X_C (см. выражение 10), постоянную времени цепи τ_c (см. выражение 2).

2.10. Изменить индуктивность L ,увеличив ее в два раза и повторить измерения и расчёты сделанные в п. 2.6, 2.7, 2.8, 2.9.

2.11.Восстановить значение индуктивности L , сделав ее равной $L=1.5\text{мН}$,а изменить емкость C , увеличив ее в два раза, и повторить измерения и расчёты сделанные в п. . 2.6, 2.7, 2.8, 2.9.

2.12. Изменить сопротивление R , сделав его последовательно равным $R= 100\text{Ом}$ и $R=5\text{кОм}$. Убедиться в переходе от колебательного процесса к апериодическому ($R>2\rho$).

2.13. Измеренные и рассчитанные данные занести в таблицу 1.

Таблица 1

№ пункта	Исходные данные			Экспериментальные данные							Расчетные параметры						
	L	C	R	U_{0m}	T_0	f_0	ω_0	λ_0	Q	G	ω_0	ρ	Q	d	X_L	X_C	$\tau_{ц}$
1																	
2																	
3																	
4																	
5																	

На основании измерений и вычислений сделать выводы по свойствам свободных колебаний в реальном контуре.

3 Отчёт должен содержать:

- 3.1. Тему и цель работы.
- 3.2. Перечень оборудования.
- 3.3. Краткие теоретические сведения.
- 3.4.Ход работы.
- 3.5. Таблицы с результатами измерений, рисунки, расчёты.
- 3.6. Выводы.
- 3.7.Ответы на контрольные вопросы.

4 Контрольные вопросы

- 4.1. Указать причину затухания свободных колебаний в реальных контурах.
- 4.2. Как влияет величина активного сопротивления на характер свободных колебаний?
- 4.3. От чего зависит частота свободных колебаний контура?

4.4. Каким образом можно получить в контуре апериодический процесс?

4.5. Какими параметрами оценивается качество контура?

4.6. По какому закону убывает амплитуда свободных колебаний?

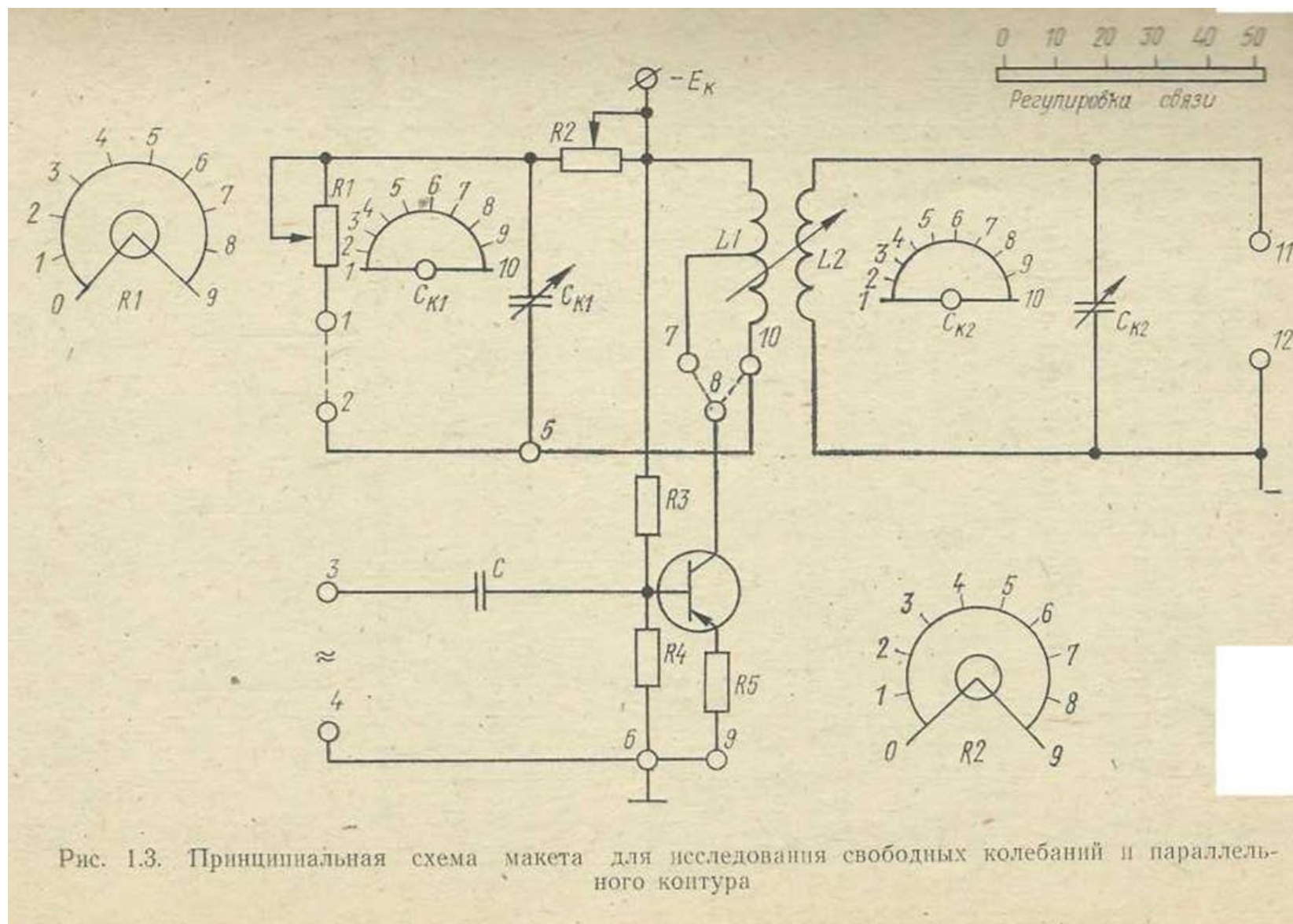


Рис. 1.3. Принципиальная схема макета для исследования свободных колебаний и параллельного контура

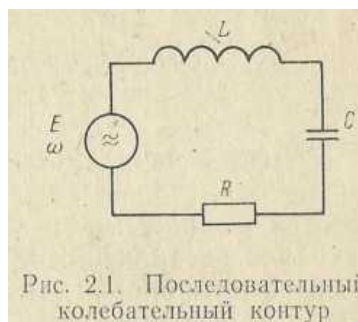
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 2

Тема: Исследование вынужденных колебаний в последовательном колебательном контуре

Цель: Изучить резонансные свойства одиночного колебательного контура. Определить экспериментально основные параметры контура.

Краткие теоретические сведения

Для получения незатухающих колебаний в контур необходимо включить источник переменной э.д.с. Если этот источник включен последовательно с элементами контура, то такой контур называется последовательным (рис. 2.1).



Если внутреннее сопротивление источника равно нулю, то ток в контуре выражается соотношением:

$$I = \frac{E}{Z} = \frac{E}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}},$$

где E — действующее значение э. д. с. источника;
 Z — полное сопротивление последовательного контура;
 R — активное сопротивление контура;
 ω — частота генератора;
 L — индуктивность контура;
 C — емкость контура.

Резонансом напряжений называется такой режим работы последовательного контура, при котором реактивная составляющая сопротивления контура становится равной нулю. Отсюда вытекают следующие свойства резонанса напряжений.

1. $X = X_L - X_C = 0$, следовательно $X_L = X_C$, т.е резонанс напряжений наступает при равенстве реактивных сопротивлений контура.

$$2. \quad X_L = \omega L, X_C = \frac{1}{\omega C} \rightarrow \omega = \frac{1}{\sqrt{LC}} = \omega_0$$

Таким образом, резонанс напряжений наступает, когда частота генератора ω равна частоте собственных колебаний контура ω_0 .

3. Сопротивление контура при резонансе чисто активно и минимально:

$$Z_p = R.$$

4. Ток в контуре при резонансе максимален и равен:

$$I_p = \frac{E}{R}$$

5. Напряжения на реактивных элементах при резонансе равны и в Q раз превышают э. д. с. источника:

$$U_{cp} = U_{Lp} = QE.$$

6. Векторная диаграмма для режима резонанса имеет вид, представленный на рис. 2.2.



Графики зависимостей тока в контуре, напряжений U_L и U_C на реактивных элементах от частоты генератора называются *резонансными кривыми*. Наибольший интерес представляет резонансная кривая $U_C = \varphi_1(\omega)$, поскольку высокочастотные приборы для измерения напряжения значительно более распространены, чем приборы для измерения тока. Резонансная кривая $U_L = \varphi_2(\omega)$, как правило, не снимается, поскольку измерить напряжение только на индуктивности не представляется возможным. (Основное активное сопротивление контура R приходится на индуктивность.)

Резонансная кривая имеет колоколообразную форму и в контурах с хорошей добротностью симметрична.

Строятся резонансные кривые в абсолютных или в относительных координатах. В абсолютных координатах по оси ординат откладывается напряжение U_c в вольтах, а по оси абсцисс частота генератора - в килогерцах (рис. 2.3).

В относительных координатах по оси ординат откладывается отношение

$$Y = \frac{U_c}{U_{cp}},$$

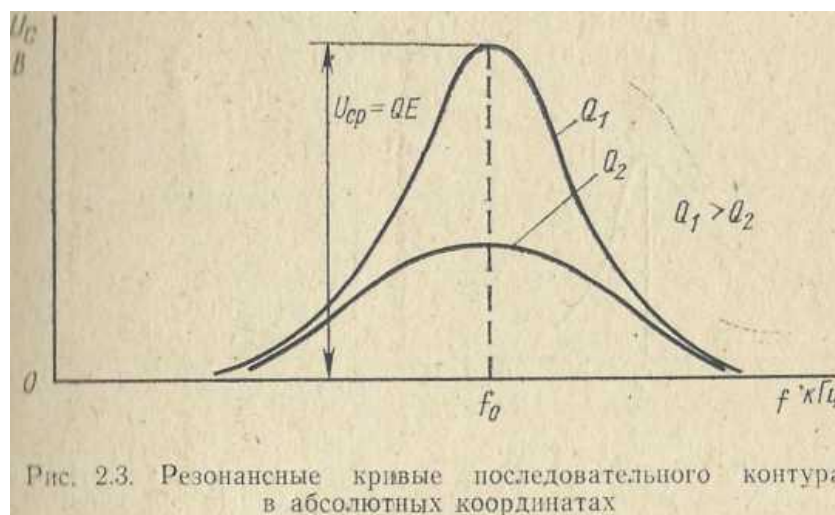
а по оси абсцисс — относительная расстройка

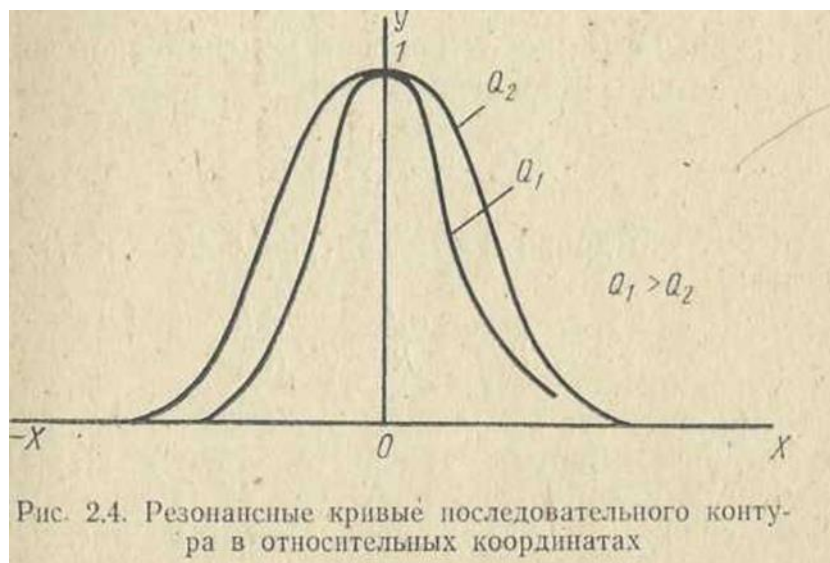
$$X = \frac{\Delta f}{f_0} = \frac{f - f_0}{f_0} \quad (\text{рис. 2.4}).$$

Чем выше добротность контура Q , тем уже его резонансная кривая (тем круче ее скаты).

Полосой пропускания контура называется полоса частот, в пределах которой ток в контуре и напряжение на конденсаторе убывают не более чем до 0,707 от резонансного значения

$$\Pi = \frac{f_0}{Q}.$$



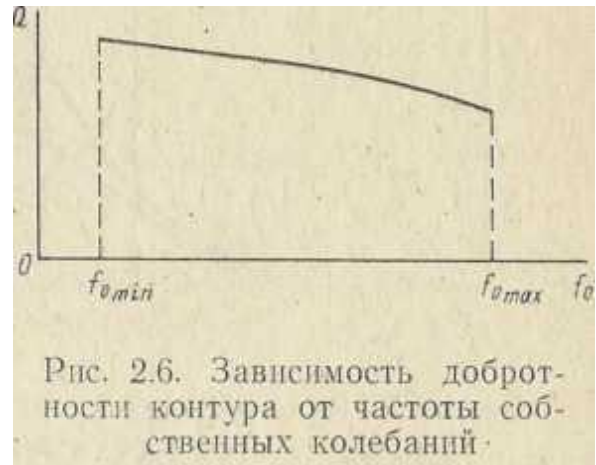
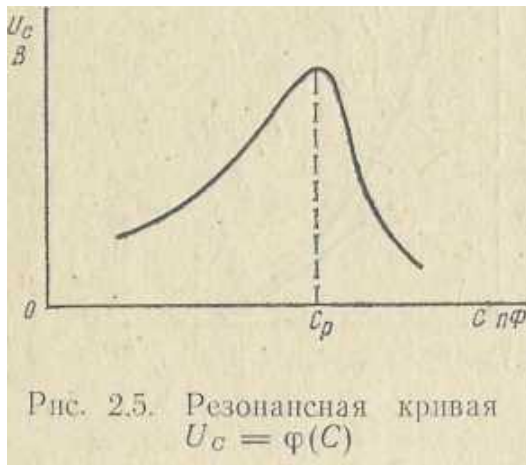


Резонансные кривые иногда называются амплитудно- частотными характеристиками контура (сокращенно АЧХ).

Поскольку чаще всего контур настраивается с помощью переменного конденсатора, то представляет практический интерес зависимость напряжения на конденсаторе U_c от емкости контура C при неизменно частоте генератора. Эту зависимость по аналогии с ранее рассмотренными так же называют *резонансной кривой*. Указанная кривая имеет уже заметную несимметричность (рис. 2.5). Добротность в данном случае может быть определена по формуле:

$$Q = \frac{C_2 + C_1}{C_2 - C_1},$$

где C_1 и C_2 — значения емкостей, при которых напряжение на емкости контура уменьшается в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным напряжением.



При изменении емкости контура и неизменной индуктивности изменяется и резонансная частота

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

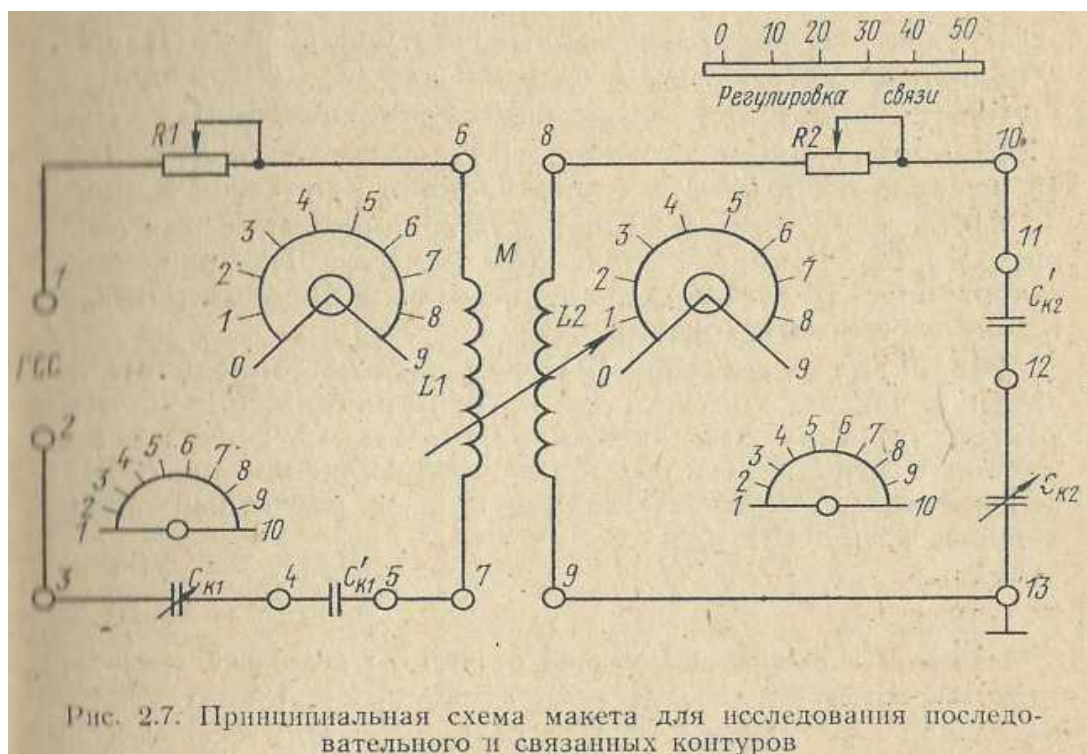
Казалось бы, что добротность контура с ростом f_0 должна возрастать:

$$Q = \frac{\rho}{R} = \frac{\omega_0 L}{R} = \frac{2\pi f_0 L}{R},$$

но с ростом частоты колебаний растут и потери энергии в контуре, причем быстрее, чем растет частота. Поэтому график зависимости добротности контура Q от частоты собственных колебаний имеет вид, приведенный на рис. 2.6.

Описание лабораторной установки

Исследование последовательного контура проводится на макете "Последовательный колебательный контур и связанные контуры». Для устранения влияния вторичного контура $L_2 C_{k2}$ ручкой регулировки связи на правой боковой стенке макета следует отодвинуть катушку $L2$ на возможно большее расстояние (45 мм). Принципиальная схема контура приведена на лицевой панели макета и рис. 2.7.



Как видно из схемы, исследуется колебательный контур, образованный последовательным соединением генератора, переменного резистора $R1$, катушки индуктивности $L1 = 1,82$ мГн, конденсатора переменной емкости $C_{к1}$, служащего для изменения резонансной частоты, и конденсатора постоянной емкости $C'_{к1}$ уменьшающего пределы изменения емкости $C_{к1}$. К гнездам 1, 2 подается напряжение от генератора стандартных сигналов типа Г4-102, к .гн. 3, 7 подключается ламповый вольтметр типа В7-17, измеряющий напряжение на емкости контура.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить лабораторную установку к выполнению работы. Для этого соединить макет с приборами. Отодвинуть катушку $L2$ на максимально возможное расстояние. Резистор $R1$ вывести полностью.

2. Включить питание приборов и дать им прогреться в течение 2-3 мин, следя за тем, чтобы стрелки измерительных приборов не выходили за пределы шкалы. На генераторе стандартных сигналов установить выходное напряжение, равное 0,5 В.

3. Снять резонансные кривые контура $U_c = \psi(f)$ при постоянной емкости контура, изменяя частоту генератора:

- а) без включения добавочного сопротивления;
- б) с включением добавочного сопротивления $R1 = 100 \text{ Ом}$ (градуировочная кривая сопротивления приведена в прил. 4).

Резонансные кривые снять для среднего значения емкости контура $C_{к1}$ равной 5 делениям шкалы. Изменяя частоту генератора, следует измерять ламповым вольтметром напряжение на емкости контура U_c .

По шкале генератора высокой частоты определить резонансную частоту контура, при которой напряжение на емкости контура оказывается максимальным. Частоту генератора надо изменять относительно резонансного значения на $\pm 24 \text{ кГц}$ через 4 кГц . Результаты измерений и расчетные величины занести в табл. 2.1, а, б.

Таблицы 2.1, а, б

Зависимость резонансной кривой от частоты колебаний генератора

$f \text{ кГц}$	$U_c \text{ В}$	$\Delta f = f - f_0$	$\Delta f / f_0$	$U_c / U_{c \text{ max}}$

Снять резонансную кривую контура при постоянной частоте генератора, изменяя емкость контура $U_c = f(C)$ при $R1 = 0$. Частоту генератора установить равной резонансной частоте контура f_0 , полученной в п. 3. Емкость контура изменять от максимального значения до минимального через одно деление, а вблизи резонанса — через 0,5 деления. Результаты измерений занести в табл. 2.2. Значение емкости контура в пФ определить по градуировочной кривой, Приведенной в прил. 6.

Таблица 2.2

Зависимость резонансной кривой от емкости контура

$C_{к1} \text{ дел}$	$C_{к1} + C'_{к1} \text{ пФ}$	$U_c \text{ В}$

Т а б л и ц а 2.3

Результаты измерений добротности контура

$C_{к1}$ дел	$C_{к1} + C'_{к1}$ пФ	f_0 кГц	$Q = 2U_{ср}$

5. Снять зависимость добротности контура от его резонансной частоты $Q = \psi(f_0)$. При снятии зависимости $Q = \psi(f_0)$ изменять емкость контура от C_{min} до C_{max} через два деления. Результаты измерений занести в табл. 2.3.

Как известно, добротность контура равна отношению напряжения на емкости контура при резонансе к э.д.с. генератора, питающего контур. Добившись резонанса при данной емкости контура, определить добротность

6. Снять резонансные кривые контура при $R1 = 0$ для максимальной и

Т а б л и ц а 2.4

Результаты снятия резонансной кривой
при минимальной емкости контура

f кГц	U_c В	Примечание
		$C_k = C_{k min} = \dots$ пФ

минимальной емкости контура и, следовательно, для минимальной и максимальной частоты контура. Частоту генератора изменять относительно резонансной частоты на ± 24 кГц через 4 кГц. Результаты измерений занести в табл. 2.4 и 2.5.

Т а б л и ц а 2.5

Результаты снятия резонансной кривой при максимальной емкости контура

f кГц	U_c В	Примечание
		$C_k = C_{k \max} = \dots$ пФ

Содержание отчета

1. Таблицы 2.1, а,б
2. По данным табл. 2.1, а, б построить резонансные кривые контура: на одном листе в абсолютном масштабе $U_c = \psi(f)$ а на другом листе — в относительном масштабе

$$\frac{U_c}{U_{c \text{ р}}} = \psi\left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)$$

для двух случаев: $R1 = 0$ и $R1 = 100$ Ом, По резонансным кривым определить графически полосу пропускания контура Π для обоих случаев.

Рассчитать добротность контура

$$Q = \frac{U_{c \text{ р}}}{E}$$

активное сопротивление контура

$$R = \frac{\rho}{Q} = \frac{\omega_0 L}{Q} = \frac{2\pi f_0 L}{Q}$$

и полосу пропускания контура

$$\Pi = \frac{f_0}{Q}$$

для обоих случаев.

Рассчитанные значения полосы пропускания контура Π сравнить с полученными по графикам.

3. Табл. 2.2.

4. По данным табл. 2,2 построить резонансную кривую контура $U_c = f(C)$.

5. Табл. 2.3.

6. По данным табл. 2.3 построить график $Q = \psi(f_0)$.

7. Таблицы 2.4 И 2.5.

8. По данным табл. 2.4 и 2.5 построить резонансные кривые $U_c = \psi(f)$ для $C_k = C_{\min}$ и $C_k = C_{\max}$. Определить в обоих случаях полосу пропускания контура, выполнив построение на графиках.

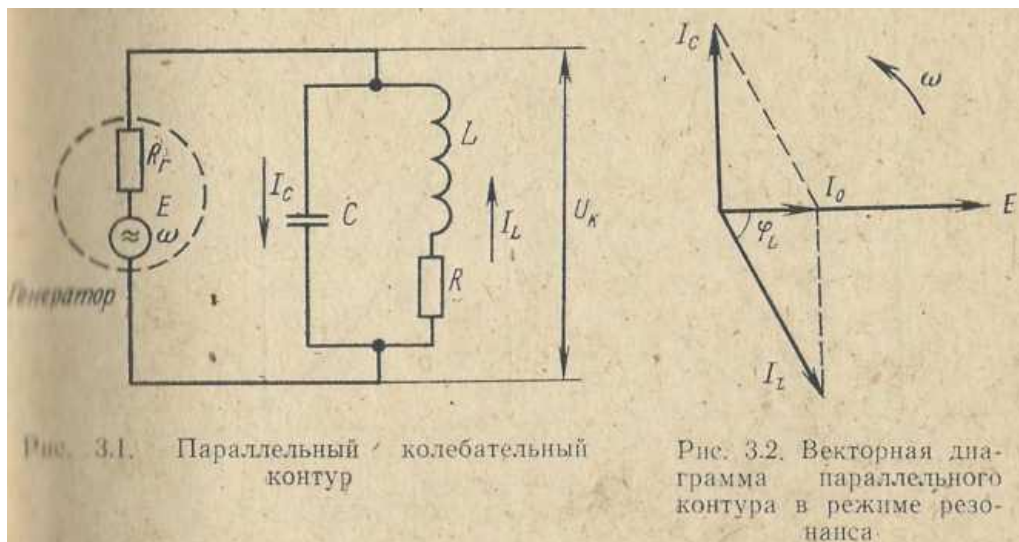
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 3

Тема: Исследование вынужденных колебаний в параллельном колебательном контуре

Цель: Изучить резонансные свойства параллельного колебательного контура. Исследовать влияние способа включения параллельного контура на его основные характеристики.

Краткие теоретические сведения

Параллельным называется колебательный контур, у которого генератор включен параллельно ветвям контура (рис. 3.1).



Поскольку активное, сопротивление, индуктивной ветви значительно больше активного сопротивления емкостной ветви, то будем считать все активное сопротивление контура R сосредоточенным в индуктивной ветви.

Резонансом токов называется такой режим работы параллельного контура, при котором контур оказывает источнику чисто активное сопротивление.

Векторная диаграмма для режима резонанса приведена на рис. 3.2.

Рассматривая контуры, добротность которых больше 30 ($Q > 30$), можно сформулировать следующие свойства резонанса токов.

1. $X_L = X_C$, т. е. резонанс токов наступает при равенстве реактивных

сопротивлений ветвей.

2. $\omega = \omega_0$. Резонанс токов имеет место, когда частота источника равна частоте собственных колебаний контура.

3. $\cos \varphi_L = 1/Q$. Поскольку $Q > 30$, то угол φ_L близок к 90° .

4. $I_L = I_C = QI_0$, т. е. токи в ветвях при резонансе примерно равны и в Q раз превышают ток в общей ветви.

5. Сопротивление контура при резонансе $Z_{кр}$ чисто активно, максимально и равно:

$$Z_{кр} = \frac{\rho^2}{R} = \frac{L}{CR} = \rho Q = Q^2 R.$$

Резонансное сопротивление $Z_{кр}$ параллельного контура иногда обозначают $R_{экр}$. Сопротивление параллельного контура в зависимости от частоты колебаний генератора изменяется. График этой зависимости имеет колоколообразную форму (рис. 3.3).

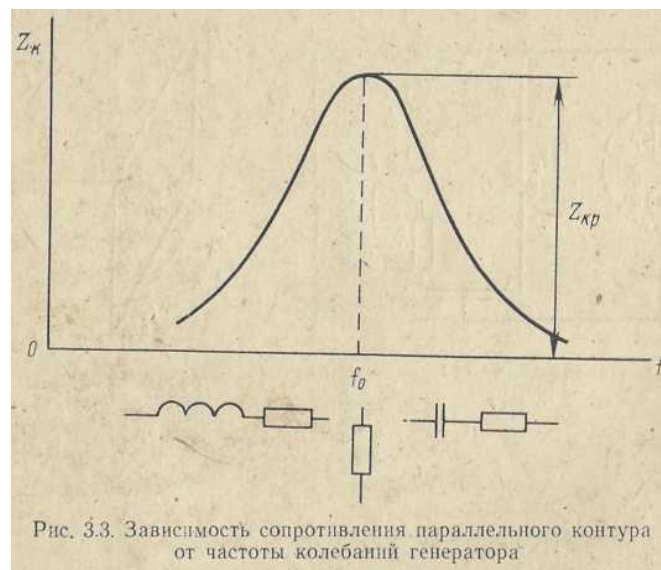


Рис. 3.3. Зависимость сопротивления параллельного контура от частоты колебаний генератора

Резонансными кривыми параллельного контура называются графики зависимостей общего тока (I_0) и напряжения на контуре (U_K) от частоты колебаний генератора f .

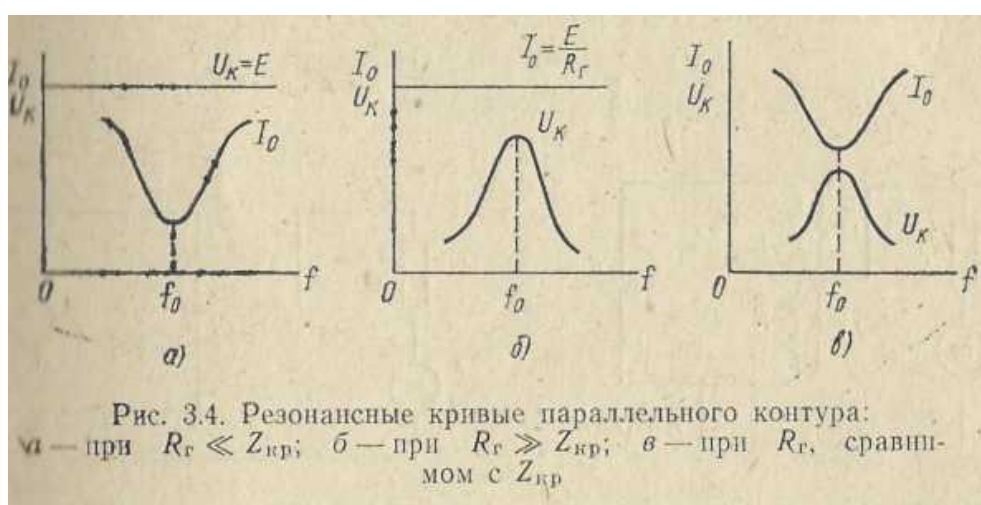
Форма резонансных кривых в значительной степени зависит от внутреннего сопротивления генератора R_r . В общем случае резонансные кривые параллельного контура определяются соотношениями:

$$I_0 = \frac{E}{R_r + Z_{кр}}; \quad U_K = I_0 Z_{кр}.$$

Резонансные кривые параллельного контура для различных значений R_r приведены на рис. 3.4.

В параллельном контуре различают две полосы пропускания: полосу пропускания по току Π_i и полосу пропускания по напряжению Π_u .

Полосой пропускания по току называется полоса частот, в пределах которой ток в общей ветви I_0 возрастает не более чем в $\sqrt{2}$ от резонансного значения



Полосой пропускания по напряжению называется полоса частот, в пределах которой напряжение на контуре U_K уменьшается не более чем до $1/\sqrt{2} = 0,707$ от резонансного значения.

В общем случае полосы пропускания параллельного контура по току и напряжению не равны: $\Pi_i \neq \Pi_u$

В табл. 3.1 приведены значения Π_i и Π_u для трех величин R_r .

Таблица 3.1

Влияние внутреннего сопротивления генератора на полосу пропускания

R_r	Π_i	Π_u
$R_r \ll R_{экв}$	$\frac{f_0}{Q}$	∞
$R_r = R_{экв}$	$\sqrt{2} \frac{f_0}{Q}$	$2 \frac{f_0}{Q}$
$R_r \gg R_{экв}$	∞	$\frac{f_0}{Q}$

Рассмотренный параллельный контур называется *контуром I вида*. В отличие от него параллельным *контуром II вида* называется параллельный контур, часть индуктивности которого включена в емкостную ветвь (рис. 3.5)

В параллельном контуре II вида частота собственных колебаний ω

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}},$$

а резонансное сопротивление имеет другую величину:

$$Z_{крII} = p^2 Z_{крI},$$

где $p = \frac{L_1}{L}$ — коэффициент включения.

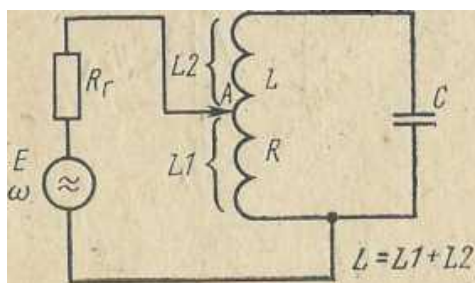


Рис. 3.5. Параллельный контур II вида

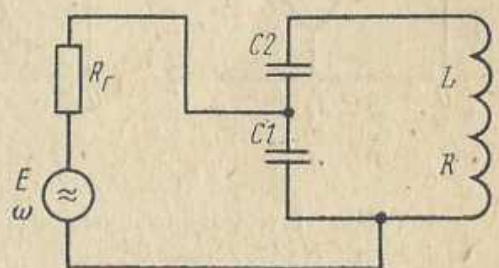


Рис. 3.6. Параллельный контур III вида

$$Z_{крI} = \frac{L}{CR}.$$

такая же, как и в параллельном контуре I вида.

Изменяя плавно точку подключения генератора (точка 4 на рис. 3.5), можно изменять резонансное сопротивление контура от 0 и до максимального:

Параллельным контуром III вида называется параллельный контур, часть емкости которого включена в индуктивную ветвь (рис. 3.6). У такого контура частота собственных колебаний

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC_{\text{общ}}}},$$

где $C_{\text{общ}} = \frac{C_1 C_2}{C_1 + C_2}$.

Резонансное сопротивление контура III вида

$$Z_{\text{крIII}} = p^2 Z_{\text{крI}},$$

где $p = \frac{C_{\text{общ}}}{C_1}$, а $Z_{\text{крI}} = \frac{L}{C_{\text{общ}} R}$.

Описание лабораторной установки

Исследование параллельного контура производится на макете «Параллельный колебательный контур. Резонансный и полосовой усилители». Принципиальная схема макета приведена на лицевой панели и на рис. 1.3.

Исследованию подлежит параллельный контур, включенным в коллекторную цепь транзистора типа П403.

Для устранения влияния вторичного контура $L_2 C_{K2}$ ручкой регулировки связи на правой боковой стенке макета следует отодвинуть катушку индуктивности L_2 на возможно большее расстояние от катушки индуктивности L_1 (40—45 мм).

Параллельный контур состоит из конденсатора переменной емкости C_{K1} , служащего для изменения резонансной частоты, катушки индуктивности L_1 , имеющей отвод от части витков, и переменного резистора R_2 . Контур может быть включен в коллекторную цепь транзистора полностью (путем закорачивания гн. 8, 10) или частично, как контур II вида (гн 7, 8 закорочены).

Параллельно контуру (гн. 1, 2 закорочены) может быть включен шунтирующий резистор R_1 . На базу транзистора гн. 4, 4) подается Напряжение от генератора стандартных сигналов типа Г4-102. Напряжение на контуре измеряется ламповым вольтметром типа ВЗ-38, который подключается к гн. 5, 6. Питание лабораторного макета осуществляется от выпрямителя на 15 В, смонтированного в лабораторном стенде УСПЭ-1. На коллектор транзистора подается напряжение $E_k = -9$ В.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить лабораторную установку к выполнению работы. Для

этого следует соединить макет с выпрямителем на 15 В с помощью штепсельного разъема. Подключить на вход усилителя генератор стандартных сигналов Г4-102, а на выход контура — ламповый вольтметр ВЗ-38. Отодвинуть катушку $L2$ на максимально возможное расстояние. Резистор $R2$ вывести полностью. Резистор $R1$ не выключать (гн. 1, 2 разомкнуть).

2. Подключить колебательный контур к транзистору, закоротив гн. 8, 10.

3. Включить питание макета и приборов, дать им прогреться 2-3 мин, следя за тем, чтобы стрелки измерительных приборов не выходили за пределы шкалы. Установить на вольтметре выпрямителя напряжение 9 В. Подать на вход усилителя от генератора стандартных сигналов напряжение $U_{вх}=0,1$ В.

4. Снять, резонансные кривые контура 1 вида (полное включение) по напряжению $U_K = \varphi(f)$ при максимальном значении емкости для следующих случаев:

- а) без включения добавочного сопротивления;
- б) с включением добавочного сопротивления $R_2 = 100$ Ом (градуировочная кривая резистора приведена в прил. 4);
- в) с включением параллельно контуру шунтирующего сопротивления R_1 Величина шунтирующего сопротивления подбирается такой, чтобы на резонансной частоте напряжение на контуре было равно напряжению, полученному в и. 4б (градуировочная кривая резистора $R1$ приведена в прил. 5).

Для снятия кривых конденсатор вывести в крайнее правое положение. На генераторе стандартных сигналов установить диапазон частот 0,1 — 0,18 МГц. Плавно изменяя частоту генератора, добиться максимального показания лампового вольтметра. Определить по шкале генератора резонансную частоту.

Далее частоту генератора изменить в обе стороны от резонансной на ± 14 кГц через 2 кГц, фиксируя при этом напряжение на контуре. Результаты измерений занести в табл. 3.2.

Таблица 3.2

Результаты снятий резонансных кривых параллельного контура

Условия наблюдения	Отклонение частоты генератора, кГц								
	—14	...	—4	—2	0	2	4	...	14
$U_{кI}$ В R_I — отключен $R_2 = 0$									
$U_{кI}$ В R_I — отключен $R_2 = 100$ Ом									
$U_{кI}$ В $R_1 = \dots$ $R_2 = 0$									
$U_{кII}$ В R_I — отключен $R_2 = 0$									

Примечание. $C_k = C_{k \max} = 1000$ пФ.

5. Снять резонансную кривую контура II вида (неполное включение) по напряжению $U_{кII} = \varphi(f)$ при максимальном значении емкости. Для неполного включения контура разомкнуть гн. 8, 10, замкнуть гн. 7, 8. Шунтирующее и добавочное сопротивления выключить (разомкнуть гн. 1, 2, потенциометр R_2 вывести в крайнее левое положение). Частоту генератора изменять так же, как в п. 4. Результаты измерений занести в табл. 3.2.

6. Снять резонансную кривую контура I вида по напряжению $U_{кГ} = \varphi(f)$ при минимальном значении емкости контура. Для снятия кривой конденсатор вывести в крайнее левое положение, на генераторе стандартных сигналов установить диапазон частот 0,18 — 0,35 МГц. Определить резонансную частоту. Далее частоту генератора изменять в обе стороны от резонансной на ± 32 кГц через 4 кГц. Результаты измерений занести в табл.

Таблица 3.3

Результаты снятия резонансной кривой параллельного контура при минимальной емкости

Условия наблюдений	Отклонение частоты генератора, кГц								
	32	...	-8	-4	0	4	18	...	-32
U_n , В									
$R1$ — отключен									
$R_z = 0$									

Примечание. $C_k = C_{k \min} = 80$ пФ.

3.3.

$$U_k = \frac{U_{k \text{ рез}}}{\sqrt{2}} = 0,707 U_{k \text{ рез}},$$

7. Исследовать зависимость полосы пропускания и добротности от величины емкости контура. Исследование проводится для контура I вида при минимальном и максимальном значении емкости контура. Сопротивление $R_z = 0$, а шунтирующий резистор $R1$ выключен. При определенном значении емкости (например $C_k = C_{\min}$) настроить генератор на резонансную частоту, определить по ламповому вольтметру напряжение на контуре при резонансе $U_{k \text{ рез}}$. Затем изменить настройку генератора в обе стороны от резонанса так, чтобы напряжение на контуре уменьшилось в $\sqrt{2}$ раз по сравнению с резонансным. Разность частот настройки генератора $f_2 - f_1$ при которых напряжение

будет равна полосе пропускания контура: $\Pi = f_2 - f_1$ Добротность определить по формуле:

$$Q = \frac{f_0}{\Pi}$$

Такие измерения проделать дважды: при минимальном и максимальном значениях емкости контура. Результаты измерений и вычислений занести в табл. 3.4.

Таблица 3.4

Результаты измерений полосы пропускания и добротности

Условия измерения	f_0 кГц	$U_{к\text{ рез}}$ В	$U_{к}$ В	f_1 кГц	f_2 кГц	Δf кГц	Q
$C_k = C_{k\text{ min}}$							
$C_k = C_{k\text{ max}}$							

Содержание отчета

1. Табл. 3.2.

2. По данным табл. 3.2 построить на одном листе резонансные кривые контура в относительном масштабе:

$$\frac{U_k}{U_{к\text{ рез}}} = \psi(\Delta f)$$

для четырех различных условий исследования. По резонансным кривым определить графически полосу пропускания.

3. Табл. 3.3.

4. По данным табл. 3.3 построить резонансную кривую в относительном масштабе:

$$\frac{U_k}{U_{к\text{ рез}}} = \psi(\Delta f).$$

По резонансной кривой определить графически полосу пропускания.

5. Табл. 3.4.

6. Расчет резонансной частоты контура при максимальном значении емкости:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_k C_{k1}}},$$

где индуктивность контура $L_k = 2$ мГн.

7. Расчет эквивалентного сопротивления контура 1 вида при резонансе для максимального значения емкости контура:

$$R_{\text{экв I}} = Q \omega_0 L_1.$$

Величину добротности контура Q взять из табл. 3.4.

8. Расчеты эквивалентного сопротивления контура II вида при резонансе для максимального значения емкости контура:

$$R_{\text{экв II}} = \left(\frac{L_1'}{L_1} \right)^2 R_{\text{экв I}},$$

где L_1 — общая индуктивность контура;
 $L_1' = 0,6L_1$ — индуктивность индуктивной ветви контура.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 5

Тема: Настройка системы из двух связанных контуров

Цель: Изучить методику получения первого, второго и полного резонансов. Исследовать влияние связанных контуров друг на друга

Краткие теоретические сведения

Связанными контурами называется система из двух или более контуров, у которых электромагнитные колебания, происходящие в одном из них, частично передаются в другой, в результате чего происходит обмен энергиями между ними.

В общем случае число связанных контуров в системе может быть любым, но чаще всего их два, причем источник питания включается только в один контур, который называется *первичным* (или первым). *Вторичный* (или второй) контур получает энергию от первого через элемент связи.

В зависимости от элемента связи различают пять простейших видов связи (рис. 4.1).

Наибольшее практическое применение нашла индуктивная связь. Под действием э. д. с. источника в первом контуре протекает ток I_1 который, проходя по индуктивности первого контура L_1 , создает вокруг нее переменное магнитное поле. Это поле, пересекая витки катушки второго контура L_2 , индуцирует в ней э. д. с. взаимной индукции E_2 , которая и создает ток во втором контуре I_2 .

Изменение связи между контурами достигается путем изменения расстояния между катушками, либо путем поворота одной катушки относительно другой.

Ток в первом контуре, с учетом влияния второго контура, определяется соотношением:

$$I_1 = \frac{E}{\sqrt{(R_1 + \Delta R_1)^2 + (X_1 + \Delta X_1)^2}},$$

где E — э. д. с. источника;
 R_1 — активное сопротивление первого контура;
 $X_1 = \omega L_1 - \frac{1}{\omega C_1}$ — реактивное сопротивление первого контура;

$$\Delta R_1 = \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} R_2 \text{ — вносимое активное сопротивление;}$$

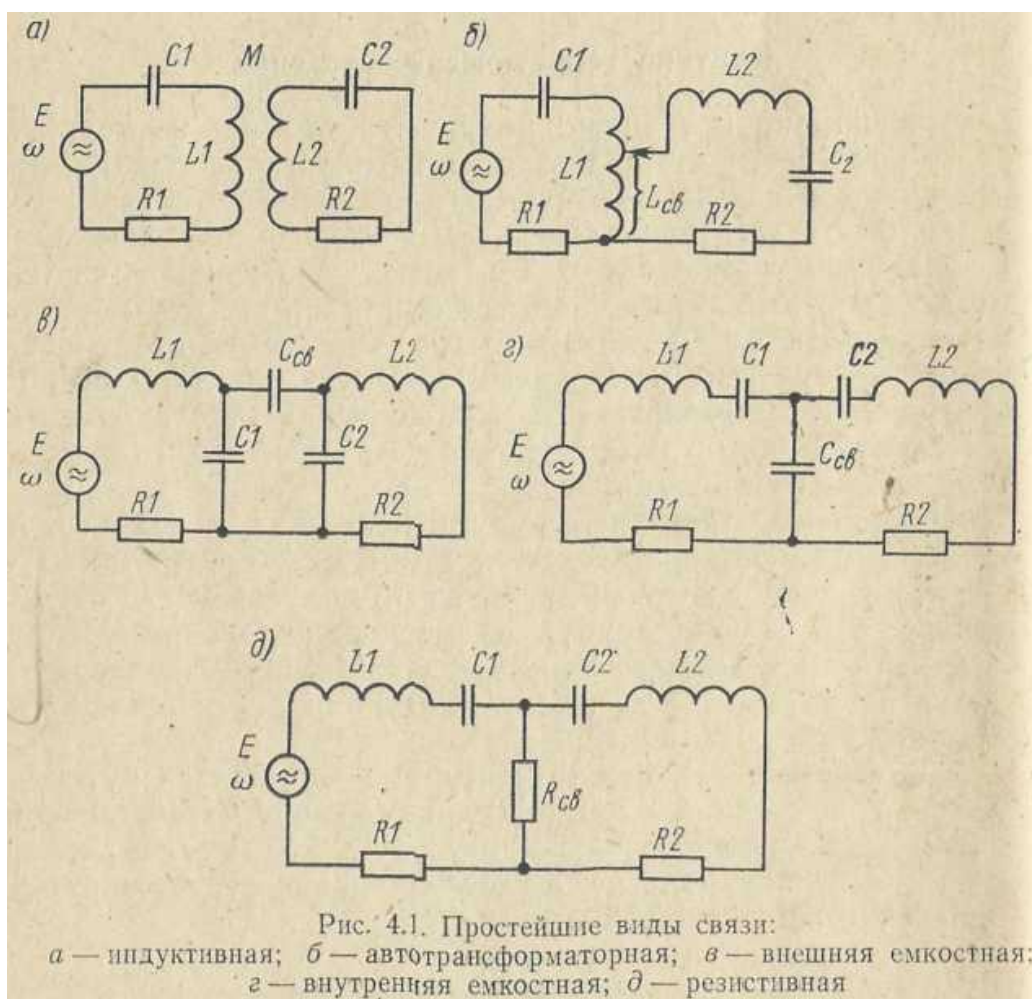
M — коэффициент взаимной индукции;

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + X_2^2} \text{ — полное сопротивление второго контура;}$$

R_2 — активное сопротивление второго контура;

$$X_2 = \omega L_2 - \frac{1}{\omega C_2} \text{ — реактивное сопротивление второго контура;}$$

$$\Delta X_1 = - \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} X_2 \text{ — вносимое реактивное сопротивление.}$$



Знак «—» в формуле означает, что вносимое реактивное сопротивление по своему характеру противоположно реактивному сопротивлению второго контура.

Резонансом в связанных контурах называется такой режим работы, при котором вся система представляет для источника чисто активное сопротивление.

Из приведенной выше формулы можно записать общее условие резонанса:

$$X_1 + \Delta X_1 = 0.$$

Если контуры настроены в резонансе на частоту генератора $f = f_{01} = f_{02}$, то $X_1 = X_2 = 0$.

В случае настроенных контуров ток в контурах определяется соотношениями:

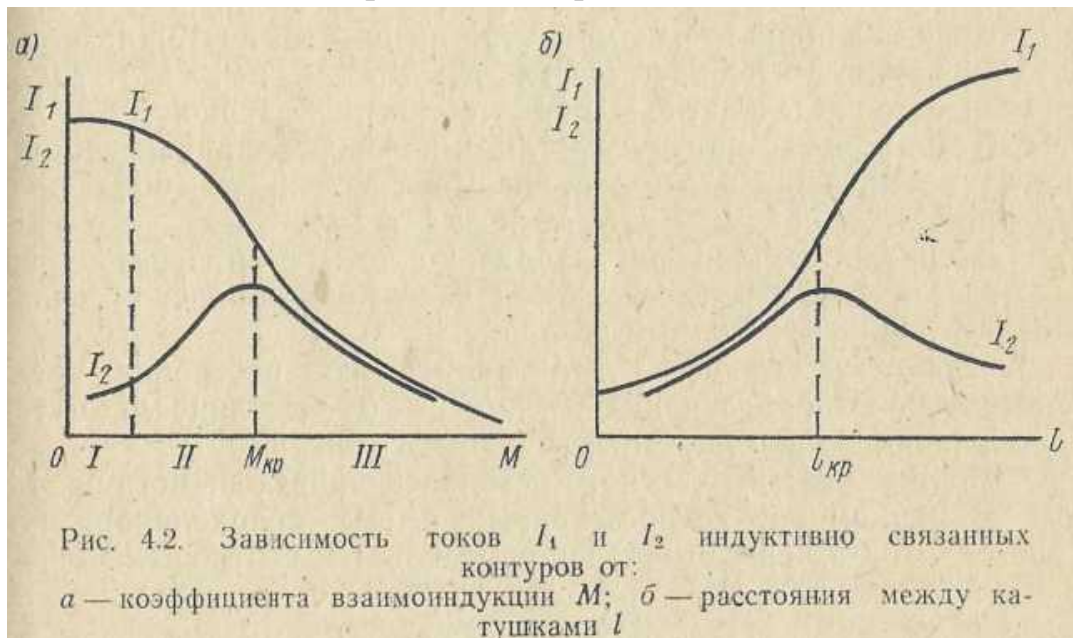
$$I_1 = \frac{E}{R_1 + \Delta R_1} = \frac{E}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2}};$$

$$I_2 = I_1 \frac{\omega M}{R_2} = \frac{E \omega M}{R_1 R_2 + \omega^2 M^2}.$$

Из последнего соотношения следует, что токи I_1 и I_2 , а следовательно, и напряжения на конденсаторах индуктивно связанных настроенных контуров зависят от величины связи (коэффициента взаимной индукции M или коэффициента связи

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

Указанные зависимости приведены на рис. 4.2.



Поскольку с увеличением расстояния l между катушками связь между контурами уменьшается, то оба вида графиков, приведенных на рис. 4.2, а, б, напоминают зеркальные отображения один другого.

При наибольшем удалении второго контура ($l_{\max}$) связь между контурами

$$U_{C1} = \frac{E}{R_1 + \frac{\omega^2 M^2}{R_2}} \frac{1}{\omega C_1}$$

практически отсутствует ($M \approx 0$), ток I_1 и соответственно напряжение U_{C1} максимальны. С увеличением связи, т. е. с уменьшением расстояния l , ток I_2 и соответственно напряжение убывают. В выражении коэффициент взаимной индукции M входит как в числитель, так и в знаменатель, причем в знаменатель во второй степени.

$$U_{C2} = I_2 \frac{1}{\omega C_2} = \frac{E \omega M}{R_1 R_2 + \omega^2 M^2} \frac{1}{\omega C_2}$$

Анализ данного выражения показывает, что при некоторой связи, называемой критической, ток I_2 и напряжение U_{C2} достигают максимума.

$$M_{кр} = \frac{\sqrt{R_1 R_2}}{\omega}; \quad I_{2 \max} = \frac{E}{2\sqrt{R_1 R_2}}$$

Критическая связь соответствует режиму передачи максимальной мощности во второй контур ($\Delta R_1 = R_1$). Связь больше критической ($M > M_{кр}$; $l < l_{кр}$; $\Delta R_1 > R_1$) называется *сильной* (область III на рис. 4.2, а).

Когда влияние второго контура на первый ничтожно мало, то им можно пренебречь ($\Delta R_1 \ll R_1$; $M \ll M_{кр}$; $l > l_{кр}$). Такая связь называется *очень слабой* (область I на рис. 4.2, а).

Связь меньше критической, при которой влиянием второго контура пренебречь нельзя, называется *слабой* (область II на рис. 4.2, а, $\Delta R_1 < R_1$; $M < M_{кр}$; $l > l_{кр}$).

В связанных контурах различают четыре вида резонанса:

а) I частный резонанс; б) II частный резонанс; в) сложный резонанс; г) полный резонанс.

I частный резонанс — это такой способ настройки, когда общее условие резонанса, $X_1 + \Delta X_1 = 0$ выполняется путем изменения только параметров первого контура.

Кривые первого частного резонанса приведены на рис. 4.3. В данном случае обе кривые имеют колоколообразную форму. Ток в первом контуре определяется соотношением

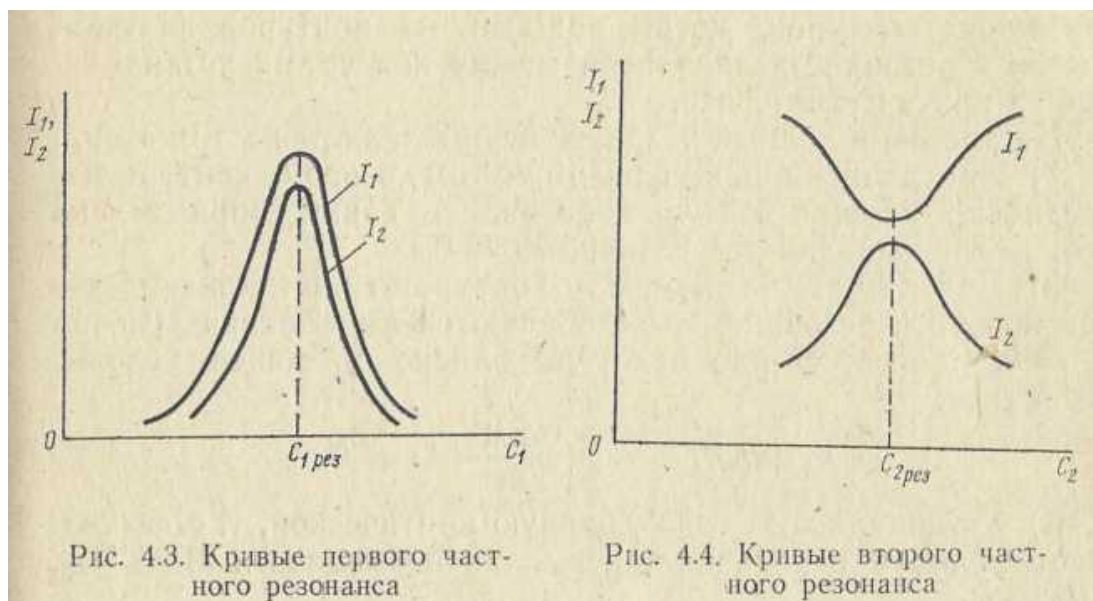
$$I_1 = \frac{E}{\sqrt{(R_1 + \Delta R_1)^2 + (X_1 + \Delta X_1)^2}},$$

при резонансе $X_1 + \Delta X_1 = 0$ он максимален, а при отходе от резонанса в любую сторону падает. Ток во втором контуре

$$I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = I_1 \frac{\omega M}{Z_2}.$$

Поскольку параметры второго контура постоянны, то ток I_2 изменяется пропорционально току I_1 .

II частным резонансом называется такой способ настройки связанных контуров, при котором общее условие резонанса $X_1 + \Delta X_1 = 0$ выполняется путем изменения параметров только второго контура. Кривые II частного резонанса приведены на рис. 4.4.



Кривая $I_2 = \frac{E_2}{Z_2}$ имеет колоколообразную форму, так как

при резонансе Z_2 минимально, а при отходе от резонанса в любую сторону, Z_2 увеличивается; следовательно, ток I_2 уменьшается. Ток I_1 изменяется

$$I_1 = \frac{E - E_1'}{Z_1},$$

где E — э. д. с. генератора;
 E_1' — противо э. д. с., наводимая током I_2 в первом контуре.

таким образом, поскольку параметры первого контура не изменяются.

Так как при резонансе I_2 максимален, следовательно, максимальной будет и противо э. д. с. E_1' , то ток I_1 оказывается минимальным.

Все сказанное относительно хода кривых токов I_1 и I_2 при I и II частных резонансах справедливо и для кривых напряжений U_{C1} и U_{C2}

Поскольку изменение частоты собственных колебаний контуров осуществляется путем изменения емкостей контуров, то указанные графики (рис. 4.3 и 4.4) часто строятся в зависимости от соответствующих емкостей C_1 и C_2 .

Сложный резонанс — это такой способ настройки, когда помимо выполнения условия одного из частных резонансов добиваются выполнения условия передачи максимальной мощности $\Delta R_1 = R_1$. Практическое выполнение условий сложного резонанса достигается многократной настройкой одного из контуров и соответствующим изменением связи между контурами.

Полным резонансом называется такой способ настройки связанных контуров, когда каждый из контуров настраивается в резонанс отдельно и между контурами устанавливается критическая связь.

Настройка в полный резонанс осуществляется в три этапа:

1. При удаленном или разомкнутом втором контуре настраивают первый контур в резонанс. Таким образом, на этом этапе выполняется условие $X_1 = 0$.

2. При слабой связи между контурами настраивают второй контур в резонанс, т. е. добиваются выполнения условия $X_2 = 0$. Соответственно будет выполнено и общее условие резонанса:

$$X_1 + \Delta X_1 = X_1 + \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} X_2 = 0.$$

3. Устанавливают связь, равную критической, т. е. выполняют условие передачи максимальной мощности $M = M_{кр}$; $\Delta R_1 = R_1$.

Описание лабораторной установки

Исследование связанных контуров производится на макете «Последовательный контур и связанные контуры». Принципиальная схема макета приведена на лицевой панели макета и на рис. 2.7. Исследованию подлежат два индуктивно связанных контура.

Первый контур образован последовательным соединением генератора, катушки индуктивности $L1$, конденсатора переменной емкости $C_{к1}$, служащего для изменения резонансной частоты контура, конденсатора постоянной емкости $C'_{ки}$ уменьшающего пределы изменения емкости $C'_{к1}$, и переменного резистора $R1$.

Вторичный контур состоит из катушки индуктивности $L2$, конденсатора переменной емкости $C_{к2}$, конденсатора постоянной емкости $C'_{к2}$ и переменного резистора $R2$.

Связь между контурами регулируется путем изменения расстояния между катушками индуктивности. Ручка регулировки связи помещается на правой боковой стенке макета.

К гнездам 1, 2 подается напряжение от генератора стандартных сигналов типа Г4-102; ламповый вольтметр типа В.7-17, включенный в гн. 3, 7, измеряет напряжение на емкости первого контура. К гнездам 10, 13 подключается вольтметр типа В3-38, измеряющий напряжение на емкости вторичного контура.

Порядок выполнения работы

1. Подготовить лабораторную установку к выполнению работы, для чего соединить макет с приборами. Резисторы $R1$ и $R2$ вывести полностью. Установить слабую связь между контурами (катушку индуктивности $L2$ отодвинуть на максимально возможное расстояние, приблизительно равное 45 мм).
2. Включить питание приборов и дать им прогреться в течение 2—3 мин, следя за тем, чтобы стрелки измерительных приборов не выходили за пределы шкалы. На генераторе стандартных сигналов установить выходное напряжение, равное $0,5 \text{ В} = 5 \cdot 10^5 \text{ мкВ}$.

- Зависимости снять для трех случаев:

- Настройку контуров на полный резонанс_ произвести следующим образом: установить наибольшее расстояние между катушками (очень слабую связь); настроить первый контур в резонанс с частотой генератора, определенной в и. 3; не меняя настройки первого контура, настроить второй контур в резонанс (изменяя емкость $C_{к2}$). Далее., изменяя расстояние между катушками от 40 мм до 0 через 5 мм, записывать показания ламповых вольтметров. При снятии этих зависимостей 'необходимо как можно точнее .отметить расстояние между катушками, соответствующее критической связи $l_{кр}$, при котором показания лампового вольтметра вторичного контура будут наибольшими. Результаты измерений, занести в табл. 4.1.

Напряжение	Расстояние между катушками l , мм									Примечание
	40	35	30	25	20	15	10	5	0	
U_1 В										$C_{K1} = C_{K1}$ рез; $C_{K2} = C_{K2}$ рез;
U_2 В										$l_{кр} = \dots$ мм
U_1 В										$C_{K1} = C_{K1}$ рез; $C_{K2} \neq C_{K2}$ рез;
U_2 В										$l_{кр} = \dots$ мм
U_1 В										$C_{K1} \neq C_{K1}$ рез; $C_{K2} = C_{K2}$ рез;
U_2 В										$l_{кр} = \dots$ мм

Такие же измерения произвести для условий п. 4б, в. Настройку контуров изменить по сравнению с резонансным значением на два деления шкалы.

5. Снять кривые первого частного резонанса, т. е. зависимость напряжений, на конденсаторах контуров от изменения емкости первого контура:

$$U_1 = \varphi_1(C_{K1}) \text{ и } U_2 = \varphi_2(C_{K1}).$$

Кривые первого частного резонанса снять при критической связи, определенной в п. 4а. Емкость первого контура изменять через одно деление, а вблизи резонанса — через 0,5 деления. Результаты измерений занести в табл. 4.2.

Таблица 4.2

Зависимость напряжений U_1 и U_2 от емкости первого контура

C_{K1} дел	C_{K1} пФ	U_1 В	U_2 В

6. Снять кривые второго частного резонанса, т. е. зависимость напряжений на конденсаторах (контуров от изменения емкости второго контура:

$$U_1 = \varphi_1(C_{K2}) \text{ и } U_2 = \varphi_2(C_{K2}).$$

Кривые второго частного резонанса снять при критическом связи, определенной в п. 4а. Емкость второго контура изменять через одно деление, а вблизи резонанса — через 0,5 деления. Результаты измерений занести в табл. 4.3.

Таблица 4.3

Зависимость напряжений U_1 и U_2 от емкости второго контура

C_{K2} дел	C_{K2} пФ	U_1 В	U_2 В

Содержание отчета

1. Значение резонансной частоты контуров, определенной в п. 3.
2. Табл. 4.1.
3. По данным табл. 4.1 построить графики $U_1=\varphi_1(l)$ и $U_2=\varphi_2(l)$ для трех случаев на одном листе, один под другим так, чтобы точки, соответствующие одинаковым расстояниям, находились на одной вертикали. Сравнить значения $l_{кр}$ для всех трех случаев. Объяснить полученные результаты.
4. Табл. 4.2.
5. По данным табл. 4.2 построить кривые $U_1=\varphi_1(C_{k1})$ и $U_2=\varphi_2(C_{k2})$. Значения емкостей в пФ определить по градуировочной кривой (прил. 6).
6. Табл. 4.3.
7. По данным табл. 4.3 построить кривые $U_1=\varphi_1(C_{k2})$ и $U_2=\varphi_2(C_{k2})$. Значения емкостей в пФ определить по градуировочной кривой (прил. 6).
8. Краткие выводы по работе.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 4

Тема: Исследование характеристик связанной колебательной системы

Цель: Ознакомиться с методикой снятия резонансных кривых связанных контуров. Исследовать зависимость формы резонансных кривых связанных контуров и полосы пропускания от величины связи между контурами.

Краткие теоретические сведения

Резонансными кривыми связанных контуров называются графики зависимостей тока во втором контуре I_2 и напряжения на конденсаторе второго контура U_{C2} от частоты колебаний генератора.

Предположим, что оба контура одинаковы, т. е. равны их частоты собственных колебаний $f_{01} = f_{02}$ и их добротности, $Q_1 = Q_2$

Форма резонансных кривых (рис. 5.1) в сильной степени зависит от величины связи между контурами.

При слабой связи между контурами ($M = M_1$ на рис. 5.1,6) ток во втором контуре при резонансе будет небольшим и равным I_2' . При отходе от резонанса в любую сторону ток во втором контуре будет уменьшаться по двум причинам:

1. Увеличение сопротивления второго контура

$$Z_2 = \sqrt{R_2^2 + x_2^2}; \quad I_2 = \frac{E_2}{Z_2} = I_1 \frac{\omega M}{Z_2}.$$

2. Уменьшение вносимого активного сопротивления ΔR_1 (рис. 5.1, в).

Действительно, вносимое активное сопротивление

$$\Delta R_1 = \frac{\omega^2 M^2}{Z_2^2} R_2$$

при резонансе максимально

$$\Delta R_1 = \frac{\omega^2 M^2}{R_2},$$

а при отходе от резонанса в любую сторону уменьшается.

Поскольку при слабой связи $M < M_{кр}$ даже при резонансе, вносимое

активное сопротивление $\Delta R_1 < R_1$ то условие передачи максимальной мощности во второй контур ($\Delta R_1 = R_1$) нарушено. Следовательно, при отходе от резонанса происходит удаление от условия передачи максимальной мощности.

Если несколько увеличить связь, например, до величины $M = M_2$, то увеличится ток при резонансе, а характер кривой, не изменится. Таким образом, при увеличении связи до критической $M = M_{кр}$ резонансные кривые идут выше и сохраняют колоколообразную форму.

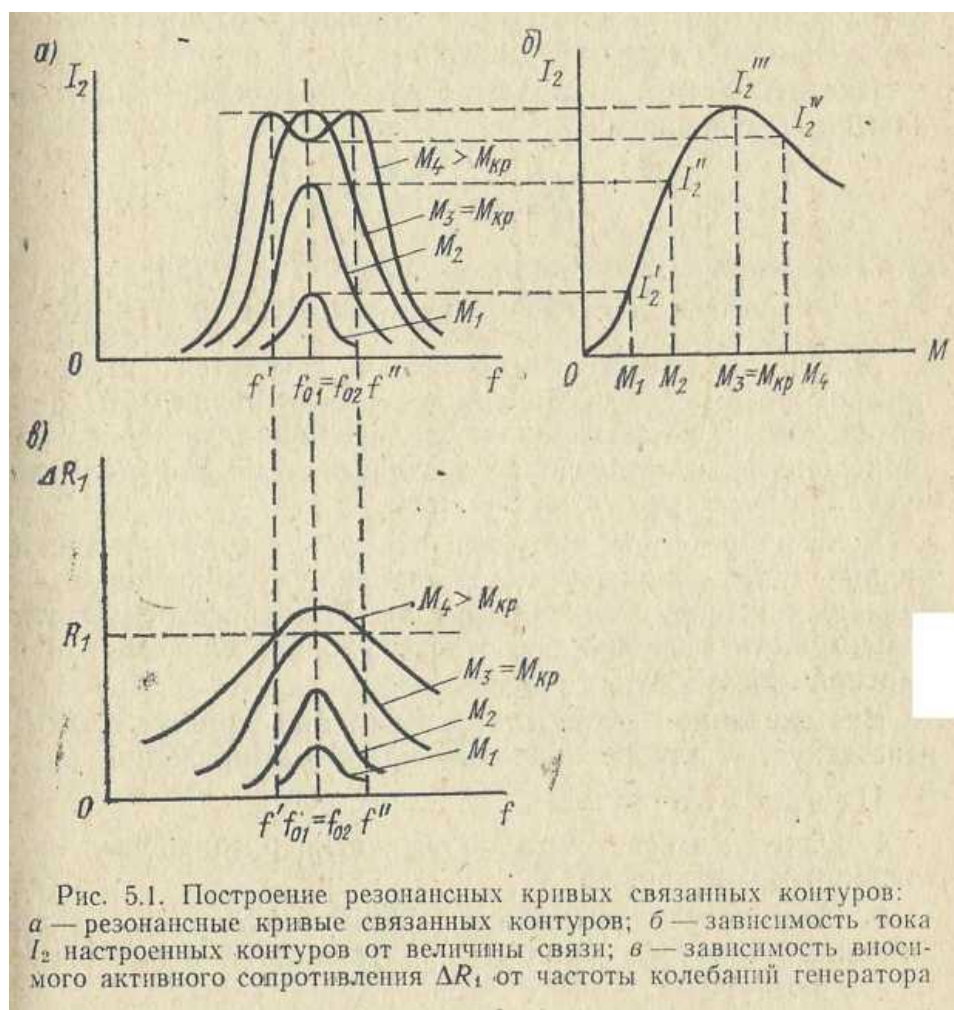


Рис. 5.1. Построение резонансных кривых связанных контуров: а — резонансные кривые связанных контуров; б — зависимость тока I_2 настроенных контуров от величины связи; в — зависимость вносимого активного сопротивления ΔR_1 от частоты колебаний генератора

При связи больше критической, например $M = M_4$ ток при резонансе равен I_2^{IV} и меньше, чем в случае критической связи. Условие передачи максимальной мощности $\Delta R_1 = R_1$ нарушено, поскольку $\Delta R_1 > R_1$. При отходе от резонанса, хотя сопротивление Z_2 возрастает, вносимое сопротивление ΔR_1 резко уменьшается, что вызывает увеличение тока I_2 , так как происходит приближение к условию передачи максимальной мощности.

На частотах f' и f'' выполнено условие передачи максимальной мощности $\Delta R_1 = R_1$ и ток I_2 достигает максимума. На этих же частотах выполнено общее условие резонанса $X_1 + \Delta X_1 = 0$. Таким образом, резонансная кривая связанных контуров при связи больше критической имеет два максимума (имеет двугорбую форму). Вершины резонансной кривой соответствуют условиям сложного резонанса.

Если установить еще большую связь, то провал будет глубже, а горбы шире, соответственно увеличится и полоса пропускания связанных контуров.

Частоты f' и f'' называются частотами связи. Они определяются выражениями

$$f' = \frac{f_0}{\sqrt{1+k}} \text{ и } f'' = \frac{f_0}{\sqrt{1-k}},$$

где f_0 — частота собственных колебаний контуров;
 k — коэффициент связи между контурами $k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$.

Максимально допустимой связью считается такая связь, при которой минимум тока I_2 достигает уровня 0,707 от максимального. При дальнейшем увеличении связи провал характеристики получается более глубоким, так что полоса пропускания разрывается на две части.

Если добротности контуров разные, то горбы резонансной кривой будут неодинаковы. В случае, когда контуры имеют разную частоту собственных колебаний, расстройка относительно частоты провала, соответствующая максимумам резонансной кривой, будет разной.

Все сказанное выше для резонансных кривых тока I_2 соответствует и для резонансных кривых напряжения U_{C2}

Описание лабораторной установки

Формы резонансных кривых связанных контуров исследуются на макете «*Последовательный контур и связанные контуры*». Принципиальная схема макета приведена на лицевой панели Макета и на рис. 2.7. (Описание лабораторной установки см. в лабораторной работе 2).

Порядок выполнения работы

1. Подготовить лабораторную установку к выполнению работы. Для этого соединить макет с приборами. Резисторы R_1 и R_2 вывести полностью. Установить слабую связь между контурами (катушку индуктивности L_2 отодвинуть на максимально возможное расстояние, приблизительно равное 45 мм).

2. Включить питание приборов и дать им прогреться в течение 2—3 мин, следя затем, чтобы стрелки измерительных приборов не выходили за пределы шкалы. На генераторе стандартных сигналов установить выходное напряжение, равное 0,5 В.

3. Определить резонансную частоту контуров. Для этого следует установить пластины конденсаторов в среднее положение (пять делений шкалы) и при очень слабой связи между контурами найти частоту генератора, при которой наблюдается резонанс, т. е. показания вольтметров получаются наибольшими.

4. Произвести настройку контуров на полный резонанс. Для этого настроить первый контур в резонанс с частотой генератора, определенной в п. 3, записать резонансное значение емкости первого контура $C_{k1рез}$; изменением емкости C_{k2} настроить вторичный контур в резонанс, записать значение резонансной емкости вторичного контура $C_{k2рез}$. Изменяя расстояние между катушками контуров от наибольшего к наименьшему, найти такое положение катушек, при котором показания вольтметра второго контура станут максимальными. Отметить это расстояние, соответствующее критической связи $l_{кр}$. При последующей работе настройку контуров не изменять, кроме того случая, когда исследуются расстроенные контуры.

5. Снять резонансные кривые связанных контуров для четырех значений величины связи между контурами:

а) связь меньше критической:

$$M < M_{кр} (l > l_{кр});$$

б) критическая связь:

$$M = M_{кр}(l = l_{кр});$$

в) связь между контурами больше критической и соответствует максимальной полосе пропускания связанных контуров, при которой провал между «горбами» резонансной кривой составляет $0,707(U_{2max})$. Эту связь следует подобрать, наблюдая за показаниями вольтметра второго контура, таким образом, чтобы напряжение на резонансной частоте составляло $0,707$ от максимального значения напряжения:

$$M > M_{кр}(l < l_{кр});$$

г) связь между контурами значительно больше критической:

$$M \gg M_{кр}(l \ll l_{кр});$$

При снятии резонансных кривых по п. 5а, б частоту генератора изменять на ± 24 кГц от резонансного значения через 4 кГц. При снятии резонансных кривых по п. 5в, г частоту генератора изменять на ± 48 кГц от резонансного значения через 4 кГц. Результаты измерений занести в табл. 5.1 (а,б, в, г)', указав для каждого случая степень связи и расстояние между катушками индуктивности, при котором снята данная резонансная кривая.

Т а б л и ц ы 5.1, а, б, в, г

Резонансная характеристика при одинаковых контурах

f кГц	Δf кГц	U_2 В	Примечание
			$M = \dots;$ $l = \dots$ мм

6. Включить во вторичный контур добавочное сопротивление $R_2 \approx 100$ Ом (градуировочная кривая переменного сопротивления приведена в прил. 4). Снять резонансную кривую контуров $U_2 = \varphi(\Delta f)$ при различных значениях добротности контуров для связи, равной связи п. 5в. При снятии резонансной кривой частоту генератора изменить на ± 48 кГц от резонансного значения через 4 кГц. Результаты измерений занести с табл. 5.2.

Таблица 5.2

Резонансная характеристика при разной добротности контуров

f кГц	Δf кГц	U_2 В	Примечание
			$M = \dots;$ $l = \dots$ мм; $Q_1 \neq Q_2$

7. Вывести добавочное сопротивление R_2 и расстроить вторичный контур относительно частоты генератора (емкость контура $C_{к2}$ уменьшить на 1,5 деления относительно резонансного значения). Снять резонансную кривую контуров $U_2 = \varphi(\Delta f)$ при связи такой же, как в п. 5в. При снятии резонансной кривой частоту генератора изменять на ± 48 кГц отрезонансного значения через 4 кГц. Результаты измерений занести в табл. 5.3.

Таблица 5.3

Резонансная характеристика при разной настройке контуров

f кГц	Δf кГц	U_2 В	Примечание
			$M = \dots;$ $l = \dots$ мм; $C_{к2} \neq C_{к2 \text{ рез}}$

Содержание отчета

1. Таблицы 5.1, а, б, в, г.
2. По данным табл. 5.1, а, б, в, г построить на одном листе резонансные -кривые $U_2 = \varphi(\Delta f)$.
3. Определить графически полосу пропускания для всех четырех случаев связи.
4. Таблицы 5.2 и 5.3. По данным табл. 5.2 и 5.3 построить резонансные кривые $U_2 = \varphi(\Delta f)$
5. Выводы по работе.

ОПИСАНИЕ СТЕНДА ЛРС- 1

Стенд ЛРС-1 предназначен для выполнения лабораторных работ по промышленной электронике, основам радиотехники и другим учебным курсам.

Конструкция и технические характеристики стенда обеспечивают исследование схем, выполненных на электронных лампах и полупроводниковых приборах.

Питание лабораторных макетов осуществляется от стабилизированных регулируемых выпрямителей «0—250 В», «0—15 В», «0—30 В», имеющих независимое включение. Каждый выпрямитель снабжен стрелочными приборами для контроля выходного напряжения выпрямителя и тока нагрузки. Макеты подключаются к источникам питания с помощью соединительного кабеля через общий разъем.

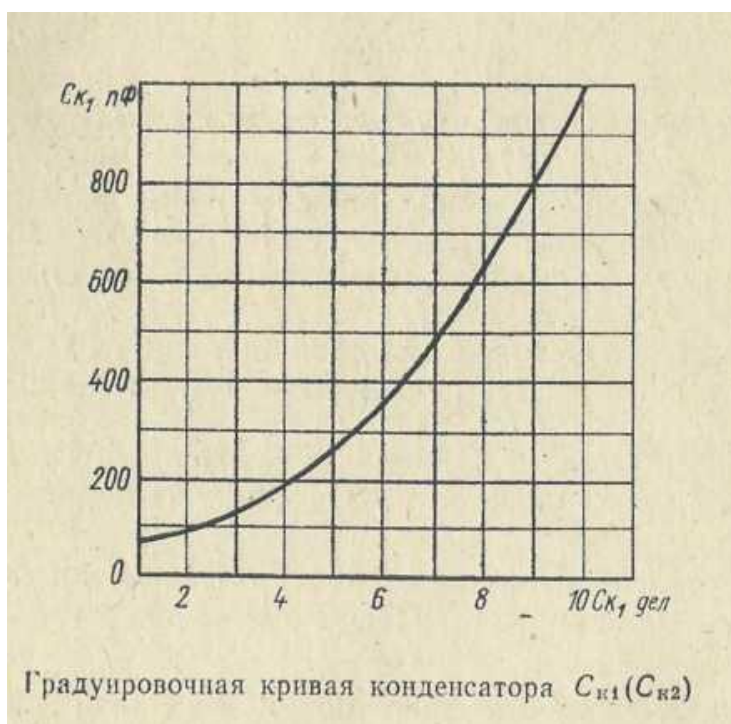
В стенде имеется генератор импульсов с автономным источником питания. Импульсный генератор имеет следующие основные технические характеристики: частота следования импульсов от 10^2 до 10^4 имп/с, длительность 5; 10; 20; 50; 100 и 200 мкс, амплитуда выходных импульсов 0—75 В, выходное сопротивление не более 0,5 кОм. Стенд снабжен главным выключателем и семью штепсельными розетками на 220 В, причем розетки, смонтированные на правой боковой панели стенда, питаются непосредственно от сети независимо от главного выключателя.

В состав стенда входят следующие радиоизмерительные приборы:

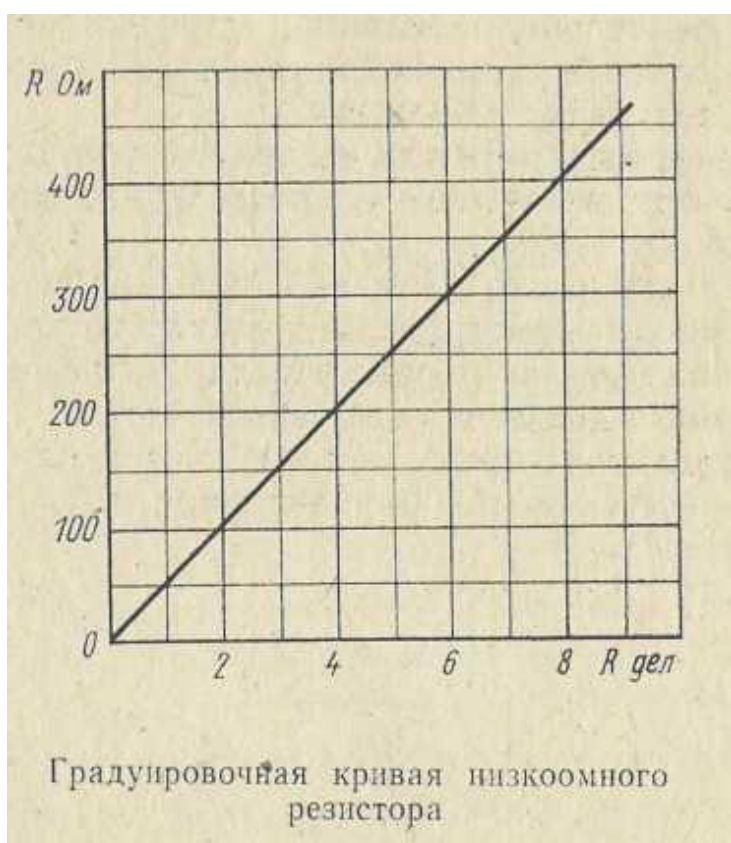
- 1 осциллограф С1-72;
2. звуковой генератор ГЗ-36А;
3. генератор стандартных сигналов Г4-102;
4. милливольтметр ВЗ-38;

5. универсальный вольтметр В7-17.

Приложение 2



Приложение 4



Приложение 5



Приложение 6



ПРАВИЛА ПРИБЛИЖЕННОГО ВЫЧИСЛЕНИЯ ЛОГАРИФМИЧЕСКИХ ВЕЛИЧИН

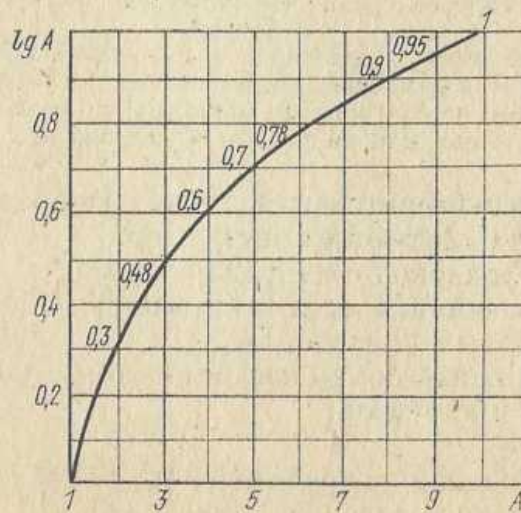
При необходимости вычисления электрических величин в логарифмическом масштабе, таких, как $K = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \text{ (дБ)}$, $K = 10 \lg \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}} \text{ (дБ)}$, $M = 20 \lg \frac{K_0}{K} \text{ (дБ)}$, $b = \ln \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} \text{ (Нп)}$, нет необходимости пользоваться таблицами логарифмов или логарифмическими линейками, достаточно использовать прилагаемый график.

Любое число можно представить в виде $L = A \times 10^n$, где A — любое число в пределах от 1 до 10. Поскольку $\lg L = n + \lg A$, то достаточно знать логарифм A , график которого приводится ниже.

Пример.

Пусть $\frac{U_1}{U_2} = 365$. $365 = 3,65 \times 10^2$. $\lg 365 = 2 + \lg 3,65 = 2 + 0,56 = 2,56$, где $\lg 3,65 = 0,56$ находится по графику. Таким образом, $20 \lg 365 = 20 \times 2,56 = 51,2 \text{ дБ}$.

Примечание. При необходимости найти величину в неперах надо полученный после логарифмирования результат умножить на 2,3.



Логарифмическая кривая