

Министерство информационных технологий
и связи Российской Федерации

Сибирский государственный университет
телекоммуникаций и информатики

В. П. БАКАЛОВ
М.И. СМЕТАНИНА
Н.М. ГУСЕЛЬНИКОВА

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ

Часть 2

**Методические указания
к компьютерным лабораторным работам**

Новосибирск
2004

УДК 621.382

Д.т.н., профессор В.П. Бакалов, к.т.н., доцент И.Н. Козляева, ст. преподаватель М.И. Сметанина, ст. преподаватель Н.Ю. Косулина, ст. преподаватель Н.М. Гусельникова. Теория электрических цепей. Часть 2. Методические указания к компьютерным лабораторным работам. СибГУТИ, Новосибирск, 2004, 44 с.

Настоящие методические указания предназначены для студентов 2 курса специальностей 210302, 210404, 210406, 210202.

В методических указаниях содержатся сведения по подготовке и выполнению лабораторных работ на ЭВМ по курсу «Основы теории цепей».

Кафедра ТЭЦ

Ил. , табл.

Рецензент

Утверждено редакционно-издательским советом СибГУТИ в качестве методических указаний.

© Сибирский государственный
университет телекоммуникаций
и информатики

Общие указания к выполнению лабораторных работ

Лабораторные работы выполняются в часы занятий, установленные расписанием. При подготовке к выполнению лабораторных работ студенты должны изучить соответствующие разделы теоретического курса, освоить приемы работы в электронной лаборатории, уметь оценивать достоверность получаемых результатов и соотносить их с положениями теории.

По итогам работы каждым студентом оформляется отчет по лабораторной работе. В отчет заносятся исходные схемы, их предварительный расчет и данные экспериментов, строятся необходимые графики, заполняются таблицы, делаются выводы по работе.

По окончании работы с учетом результатов беседы с преподавателем по теоретическому материалу и отчету студент получает зачет по работе.

Лабораторные работы по курсу «Основы теории цепей» выполняются в электронной лаборатории.

В рабочем поле создается схема в соответствии с вариантом лабораторной работы. Необходимый для схемы элемент переносится из библиотеки компонентов на рабочее поле движением мыши при нажатой левой кнопке. Для фиксирования элемента кнопка отпускается. При двойном щелчке левой кнопки по элементу в раскрывающемся диалоговом окне устанавливаются требуемые параметры элемента (величина, кратность и т.д.). Выбор подтверждается нажатием кнопки **Асепт** с помощью курсора мыши или клавиши **Enter**.

После размещения элементов на рабочем поле производится соединение их выводов проводниками. При этом необходимо учитывать, что к выводу элемента можно подключить только один проводник, в случае разветвления схемы нужно использовать элементы «узлы». К узлу может быть подключено не более четырех проводников.

Для измерения электрических величин и исследования работы электрической схемы, в соответствии с заданием, к схеме подключаются контрольно-измерительные приборы. Способ их подключения такой же, как и способ создания схемы. При необходимости каждый из приборов может быть развернут для установки режимов его работы и наблюдения результатов.

Моделирование начинается щелчком по выключателю, который находится в верхнем правом углу.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 11

«ИССЛЕДОВАНИЕ РЕАКТИВНЫХ ДВУХПОЛЮСНИКОВ»

1. **Цель работы:** расчет и экспериментальное исследование реактивных двухполюсников.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

При подготовке к выполнению работы необходимо:

- 2.1. Изучить теорию и методы синтеза реактивных двухполюсников.
- 2.2. В соответствии с заданным вариантом (табл. 3) найти схему и определить элементы исследуемого двухполюсника.
- 2.3. Для полученного двухполюсника определить резонансные частоты, рассчитать и построить график частотной зависимости входного сопротивления. Результаты расчетов свести в таблицы 1, 2.

Примечание. Расчет входного сопротивления двухполюсника выполнить на 6 частотах, взяв по 2 частоты соответственно до первого резонанса, между резонансами и после последнего резонанса.

3. Экспериментальная часть

- 3.1. Собрать схему исследуемого двухполюсника.
- 3.2. Определить экспериментально резонансные частоты с помощью прибора Боде (измерителя частотных характеристик).
- 3.3. Измерить входное сопротивление двухполюсника на расчетных частотах. Результаты измерений внести в табл. 1, 2.
- 3.4. Построить график частотной зависимости входного сопротивления (на одном рисунке с расчетным).
- 3.5. Добавить реактивный элемент в схему двухполюсника так, чтобы схема осталась канонической и исследовать его с помощью прибора Боде.

4. Методические указания

Исследование свойств рассчитанного реактивного двухполюсника производится по схеме рис. 2.

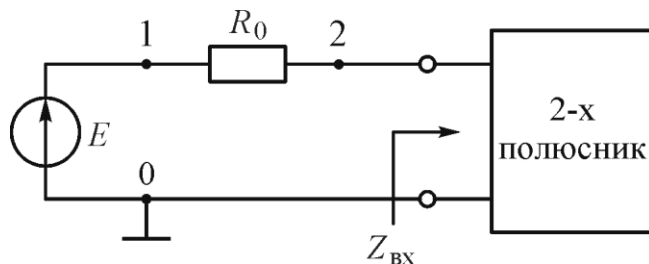


Рис. 2

4.1. Для измерения резонансных частот необходимо:

- собрать рассчитанный двухполюсник;
- к точкам 1-2 подключить вспомогательное сопротивление $R_0 = 10 \text{ кОм}$;
- подключить источник переменного напряжения с $E = 5 \text{ В}$, нижний полюс которого заземлить;
- измерения произвести с помощью измерительного прибора Bode Plotter, для этого гнезда IN прибора подключить к точкам 1-2, а гнезда OUT подключить к точкам 2-0. При этом на экране прибора будет отображаться частотная характеристика $H(jf) = U_{20}(jf)/U_{12}(jf)$, которая пропорциональна входному сопротивлению двухполюсника. Масштаб по осям выбрать линейный. Определение резонансных частот можно осуществить двумя способами:

1) по амплитудной характеристике – нули и максимумы характеристики соответствуют резонансным частотам;

2) по фазовой характеристике – перепады характеристики также соответствуют резонансным частотам.

4.2. Для измерения входного сопротивления тоже используется Bode Plotter.

Поскольку ток, протекающий в цепи, можно определить:

$$i = \frac{U_{12}}{R_0} = \frac{U_{20}}{Z_{\text{вх}}}, \quad (1)$$

то входное сопротивление двухполюсника находится из (1):

$$Z_{\text{вх}}(jf) = R_0 \cdot \frac{U_{20}}{U_{12}} = R_0 \cdot H(jf). \quad (2)$$

На расчетных частотах необходимо измерить амплитудную характеристику и рассчитать по (2) величину входного сопротивления двухполюсника. Результаты записать в таблицу 2.

Емкостный или индуктивный характер входного сопротивления можно определить по фазовой характеристике.

Таблица 1

№ п/п	$f_{\text{рез}}$ расчетное, кГц	$f_{\text{рез}}$ измеренное, кГц	Вид резонанса
1			
2			

Таблица 2

f , кГц	$Z_{\text{вх}}$ расчетное, Ом	$H(f)$	φ , °	$Z_{\text{вх}}$ измеренное, Ом

Таблица 3

Вариант	Функция, подлежащая реализации	Форма реализации
1	2	3
1	$Z(p) = \frac{2 \cdot 10^{-3} p^3 + 3 \cdot 10^7 p}{p^2 + 5 \cdot 10^9}$	1-я Кауэра
2	$Y(p) = \frac{p^3 + 1,5 \cdot 10^{10} p}{2 \cdot 10^7 p^2 + 10^{17}}$	1-я Кауэра
3	$Z(p) = \frac{2 \cdot 10^7 p^2 + 2,5 \cdot 10^{16}}{p^3 + 2,5 \cdot 10^9 p}$	2-я Кауэра
4	$Y(p) = \frac{p^2 + 1,66 \cdot 10^9}{1,33 \cdot 10^{-3} p^3 + 3,325 \cdot 10^6 p}$	2-я Кауэра
5	$Z(p) = \frac{2 \cdot 10^{-3} p^3 + 4 \cdot 10^7 p}{p^2 + 10^{10}}$	1-я Кауэра
6	$Y(p) = \frac{p^3 + 10^{10} p}{2 \cdot 10^7 p^2 + 10^{17}}$	1-я Кауэра
7	$Z(p) = \frac{3 \cdot 10^7 p^2 + 5 \cdot 10^{16}}{p^3 + 5 \cdot 10^9 p}$	2-я Кауэра
8	$Y(p) = \frac{p^2 + 2,5 \cdot 10^9}{10^{-3} p^3 + 5 \cdot 10^6 p}$	2-я Кауэра
9	$Z(p) = \frac{2 \cdot 10^7 p^2 + 2 \cdot 10^{17}}{p^3 + 2 \cdot 10^{10} p}$	1-я Кауэра
10	$Y(p) = \frac{p^2 + 5 \cdot 10^9}{2 \cdot 10^{-3} p^3 + 3 \cdot 10^7 p}$	1-я Кауэра
11	$Z(p) = \frac{1,33 \cdot 10^{-3} p^3 + 3,325 \cdot 10^6 p}{p^2 + 1,66 \cdot 10^9}$	2-я Кауэра
12	$Y(p) = \frac{p^2 + 1,66 \cdot 10^9}{1,33 \cdot 10^{-3} p^3 + 6,65 \cdot 10^6 p}$	2-я Кауэра
13	$Z(p) = \frac{2 \cdot 10^7 p^2 + 10^{17}}{p^3 + 10^{10} p}$	1-я Кауэра
14	$Y(p) = \frac{p^3 + 2 \cdot 10^{10} p}{2 \cdot 10^7 p^2 + 2 \cdot 10^{17}}$	1-я Кауэра

Продолжение таблицы 3

1	2	3
15	$Z(p) = \frac{10^{-3} p^3 + 5 \cdot 10^6 p}{p^2 + 2,5 \cdot 10^9}$	2-я Кауэра
16	$Y(p) = \frac{p^3 + 5 \cdot 10^9 p}{3 \cdot 10^7 p^2 + 5 \cdot 10^{16}}$	2-я Кауэра
17	$Z(p) = \frac{2 \cdot 10^7 p^2 + 10^{17}}{p^3 + 1,5 \cdot 10^{10} p}$	1-я Кауэра
18	$Y(p) = \frac{p^2 + 10^{10}}{2 \cdot 10^{-3} p^3 + 4 \cdot 10^7 p}$	1-я Кауэра
19	$Z(p) = \frac{1,33 \cdot 10^{-3} p^3 + 6,65 \cdot 10^6 p}{p^2 + 1,66 \cdot 10^9}$	2-я Кауэра
20	$Y(p) = \frac{p^3 + 2,5 \cdot 10^9 p}{2 \cdot 10^7 p^2 + 2,5 \cdot 10^{16}}$	2-я Кауэра

5. Требования к отчету

Отчет по работе должен содержать:

- результаты предварительного расчета;
- схемы исследуемых двухполюсников;
- схемы измерений;
- результаты измерений в виде таблиц и графиков. Примечание: $Z_{вх}$ расчетное и $Z_{вх}$ экспериментальное построить на одной плоскости с учетом знака;
- выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Какие двухполюсники называются эквивалентными?
2. Какие двухполюсники называются обратными? Правила получения обратных двухполюсников.
3. Как определить по схеме двухполюсника количество и характер резонансов?
4. Начертить график частотной зависимости сопротивления двухполюсника по заданной схеме и наоборот.
5. Записать выражение для сопротивления двухполюсника по заданной схеме и наоборот.
6. Особенности синтеза реактивных двухполюсников при различных формах реализации.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 12

«ИССЛЕДОВАНИЕ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ»

1. Цель работы: исследование свойств пассивных линейных четырехполусников.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

При подготовке к выполнению работы необходимо:

2.1. Ознакомиться с уравнениями передачи четырехполусника в разных формах, расчетом соединений четырехполусников, характеристических параметров, рабочих мер передачи.

2.2. В соответствии с заданным вариантом (табл. 7) рассчитать A -параметры Γ -образных четырехполусников (рис. 6).

2.3. Произвести расчет A -параметров сложного четырехполусника, полученного путем каскадного соединения заданных Γ -образных четырехполусников.

2.4. Определить характеристические сопротивления \underline{Z}_{c1} и \underline{Z}_{c2} и собственное ослабление A_c сложного четырехполусника. Результаты расчетов свести в табл. 4, 6.

3. Экспериментальная часть

3.1. По очереди собрать схемы заданных Γ -образных четырехполусников (рис. 3, 4) и измерить A -параметры каждого.

3.2. Соединить четырехполусники каскадно и измерить A -параметры сложного четырехполусника.

По результатам измерений A -параметров рассчитать характеристические сопротивления \underline{Z}_{c1} и \underline{Z}_{c2} .

3.3. Для каскадного соединения четырехполусников определить экспериментально собственное и рабочее ослабления.

Примечание. Измерения тока и напряжения производятся при $E = 1$ В с помощью амперметра и вольтметра, используемых в режиме «DC». Результаты измерений внести в табл. 4–6.

4. Методические указания

4.1. Параметры \underline{A}_{11} и \underline{A}_{21} можно определить в режиме холостого хода на выходе (рис. 3), измерив напряжения на входных и выходных зажимах четырехполусника ($\underline{U}_1; \underline{U}_2$) и ток на входе (\underline{I}_1).

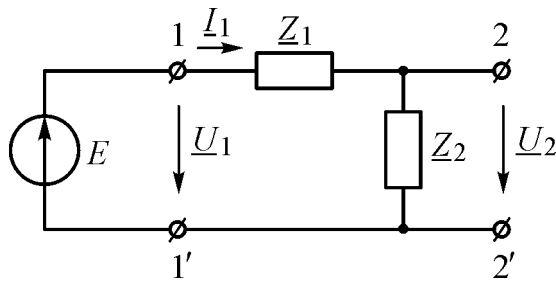


Рис. 3

По результатам измерений рассчитываются параметры \underline{A}_{11} и \underline{A}_{21} :

$$\underline{A}_{11} = \left. \frac{\underline{U}_1}{\underline{U}_2} \right|_{\underline{I}_2=0}; \quad \underline{A}_{21} = \left. \frac{\underline{I}_1}{\underline{U}_2} \right|_{\underline{I}_2=0}. \quad (1)$$

4.2. В режиме короткого замыкания на выходе (рис. 4) определяются параметры \underline{A}_{12} и \underline{A}_{22} , путем измерения токов на входе и выходе четырехполюсника (\underline{I}_1 и \underline{I}_2) и напряжения на входных зажимах (\underline{U}_1).

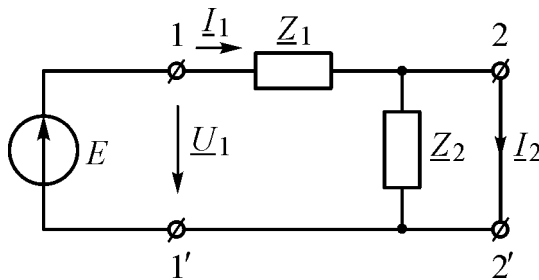


Рис. 4

Параметры \underline{A}_{12} и \underline{A}_{22} рассчитываются следующим образом:

$$\underline{A}_{12} = \left. \frac{\underline{U}_1}{\underline{I}_2} \right|_{\underline{U}_2=0}; \quad \underline{A}_{22} = \left. \frac{\underline{I}_1}{\underline{I}_2} \right|_{\underline{U}_2=0}. \quad (2)$$

Аналогичным образом определяются A -параметры второго и сложного четырехполюсников.

4.3. Измерение ослабления.

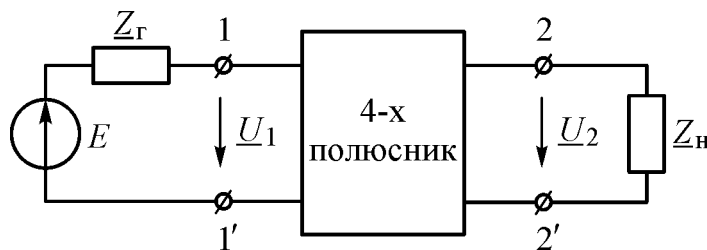


Рис. 5

Рабочее ослабление определяется соотношением:

$$A_p = 20 \lg \left| \frac{E}{2U_2} \right| + 10 \lg \left| \frac{Z_H}{Z_r} \right|, \text{ дБ.} \quad (3)$$

В случае согласованного включения четырехполюсника ($Z_r = Z_{c1}$ и $Z_H = Z_{c2}$) рабочее ослабление равно собственному.

$$A_c = 20 \lg \left| \frac{E}{2U_2} \right| + 10 \lg \left| \frac{Z_{c2}}{Z_{c1}} \right|, \text{ дБ.} \quad (4)$$

Измерения производятся для двух случаев:

1. Согласованное включение.
2. Включение на сопротивления $Z_r = Z_{c1}$; $Z_H = 3Z_{c2}$.

Для измерения собственного и рабочего ослабления собрать схему (рис. 5) и установить $E = 1 \text{ В}$.

4.3.1. Измерение собственного ослабления A_c :

- установить $Z_r = Z_{c1}$; $Z_H = Z_{c2}$;
- с помощью вольтметра (в режиме «DC») измерить напряжение U_2 ;
- по формуле (4) вычислить A_c .

4.3.2. Измерение рабочего ослабления:

- установить $Z_r = Z_{c1}$; $Z_H = 3Z_{c2}$;
- измерить напряжение U_2 ;
- по формуле (3) вычислить A_p .

4.3.3. Сравнить полученные результаты. Сделать выводы.

Таблица 4

	1-й 4-х полюсник		2-й 4-х полюсник		Каскадное соедин.	
	Расч.	Измер.	Расч.	Измер.	Расч.	Измер.
A_{11}						
A_{12} , Ом						
A_{21} , Ом						
A_{22}						

Таблица 5

	Режим ХХ на выходе			Режим КЗ на выходе		
	U_1 , В	U_2 , В	I_1 , мА	I_1 , мА	I_2 , мА	U_1 , В
1-й 4-х полюсник						
2-й 4-х полюсник						
Каскадное соедине- ние						

Таблица 6

	\underline{Z}_{c1} , Ом	\underline{Z}_{c2} , Ом	A_c , дБ	A_p , дБ
Расчетн.				
Эксперим.				

Таблица 7

Вариант	\underline{Z}_1 , Ом	\underline{Z}_2 , Ом	\underline{Z}_3 , Ом	\underline{Z}_4 , Ом
1	105	108	100	105
2	104	108	101	204
3	94,4	101	202	107
4	108	107	194	208
5	103	115	108	99,1
6	99,4	201	105	206
7	102	201	201	105
8	106	213	210	211
9	205	100	98,5	97,3
10	209	107	99,2	193
11	198	105	202	98,4
12	214	101	205	199
13	201	208	105	102
14	195	209	100	195
15	210	207	214	97,4
16	202	210	209	200

5. Требования к отчету

Отчет по работе должен содержать:

- результаты предварительного расчета;
- схемы исследуемых четырехполюсников;
- схемы измерений;
- результаты измерений и вычислений;
- выводы по работе.

6. Контрольные вопросы

1. Назвать группы параметров, характеризующих электрические свойства четырехполюсников.
2. Дать определение характеристических параметров, параметров холостого хода и короткого замыкания.

3. Как определяется входное сопротивление четырехполюсника?
4. Как определяется рабочее ослабление четырехполюсника? В каком случае рабочее ослабление равно собственному?
5. Каким образом производится расчет параметров при касадном, последовательном, параллельном соединениях четырехполюсников?
6. Что называется передаточной функцией четырехполюсника? Как она определяется?



Рис. 6

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА № 13

«ЦЕПИ С ОПЕРАЦИОННЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ»

1. **Цель работы:** расчет и экспериментальное исследование устройств, содержащих операционные усилители.

2. Подготовка к выполнению работы

При подготовке к выполнению работы необходимо:

2.1. Изучить теорию и методы расчета цепей, содержащих операционный усилитель (ОУ).

2.2. В соответствии с данными своего варианта (см. приложение, таблицы 8, 9):

- вычислить передаточные функции масштабных усилителей с инвертирующим и неинвертирующим входами (рис. 7 а, б);

- составить схему сумматора и рассчитать напряжение на его выходе (рис. 8);

- составить схему дифференциатора или интегратора (рис. 9), рассчитать и построить АЧХ в диапазоне частот 0,1 – 10 кГц с интервалом в 2 кГц.

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать схему масштабного усилителя с инвертирующим входом (рис. 7, а). Подключить на вход усилителя генератор синусоидальных сигналов с частотой $f = 5$ кГц и напряжением $\underline{U}_1 = 1$ В. Измерить напряжение на выходе усилителя \underline{U}_2 с помощью вольтметра. Определить значение передаточной функции и сравнить с предварительными расчетами.

Собрать схему масштабного усилителя с неинвертирующим входом (рис. 7, б) и повторить опыт.

3.2. Собрать схему сумматора (рис. 8). На оба входа сумматора подключить источники гармонических колебаний с частотой 1 кГц и установить заданные значения напряжений \underline{U}_{11} и \underline{U}_{12} . Неинвертирующий вход заземлить. Измерить напряжение на выходе сумматора и сравнить с расчетом.

3.3. Собрать схему интегратора (дифференциатора) (рис. 9, а, б).

Измерить АЧХ цепи в диапазоне частот 0,1 – 10 кГц с интервалом порядка 1 кГц.

Примечание: для измерения АЧХ использовать измеритель частотных характеристик «Bode Plotter», при этом на вход цепи необходимо подключить источник гармонических колебаний с напряжением $\underline{U}_1 = 0,1$ В. Гнезда IN прибора «Bode Plotter» подключить к зажимам 1-2, OUT – к зажимам 3-4. Масштаб по вертикальной и горизонтальной осям установить в соответствии с расчетными данными.

3.4. На вход интегратора (дифференциатора) подключить генератор прямоугольных импульсов с амплитудой 1 В и частотой 100 Гц, $R_r = 1$ кОм (рис. 9, в).

С помощью осциллографа пронаблюдать работу устройства. Для этого на один канал осциллографа подать входной сигнал, а на другой – выходной сигнал интегратора (дифференциатора). Убедиться в том, что выходной сигнал представляет собой интегрированный (дифференцированный) входной сигнал.

4. Требования к отчету

Отчет по работе должен содержать:

- 4.1. Схемы устройств и результаты предварительных расчетов.
- 4.2. Результаты измерений.
- 4.3. Таблицы измерений и графики АЧХ.
- 4.4. Выводы по работе.

5. Приложение

5.1. В работе применяются две основные схемы масштабных усилителей на ОУ (рис. 7).

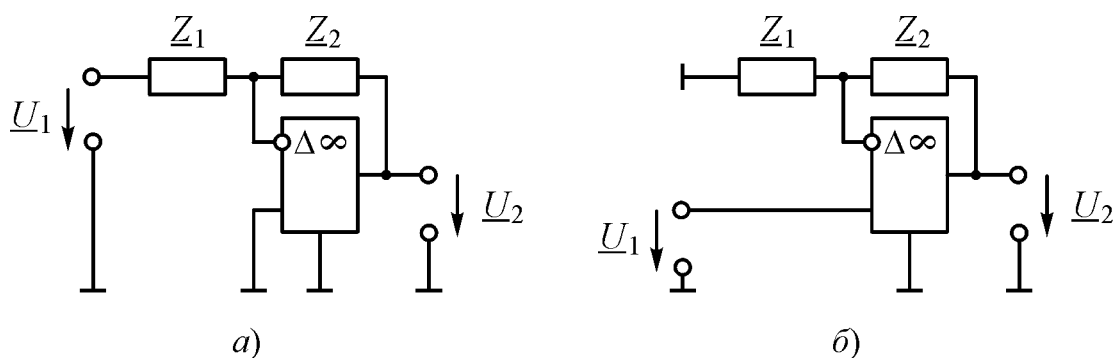


Рис. 7

Передаточные функции H масштабных усилителей определяются:

– для включения ОУ по инвертирующему входу (рис. 7, а):

$$H = \underline{U}_2 / \underline{U}_1 = -Z_2 / Z_1;$$

– для включения ОУ по неинвертирующему входу (рис. 7, б):

$$H = \underline{U}_2 / \underline{U}_1 = 1 + Z_2 / Z_1.$$

5.2. Обобщенная схема сумматора на ОУ с использованием инвертирующего и неинвертирующего входов приведена на рис. 8.

Напряжение на выходе сумматора \underline{U}_2 определяется по формуле:

$$\underline{U}_2 = a_1 \cdot \underline{U}_{11} + a_2 \cdot \underline{U}_{12} + \dots + a_m \cdot \underline{U}_{1m} + a_{m+1} \cdot \underline{U}_{1(m+1)} + \dots + a_n \cdot \underline{U}_{1n},$$

где

$$a_i = -R / R_i \text{ для } i = 1, 2, \dots, m,$$

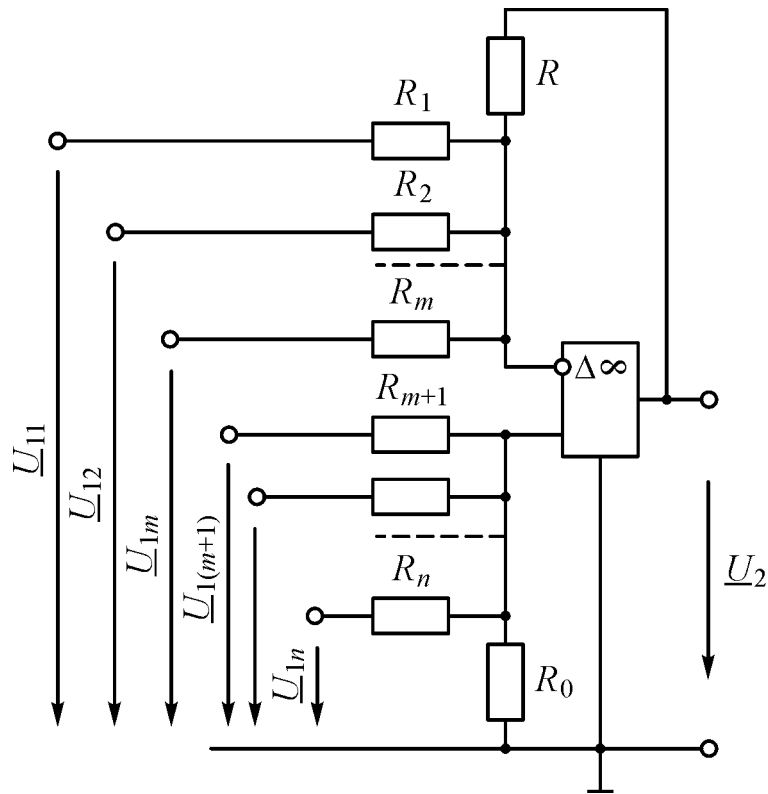


Рис. 8

$$a_i = \frac{R_0}{R_i + R_0} \left(1 + \frac{R}{R_{\text{эКВ}}} \right) \text{ для } i = (m+1), (m+2), \dots, n,$$

$$1/R_{\text{эКВ}} = 1/R_1 + 1/R_2 + \dots + 1/R_m$$

$$R_i \square R_0, \text{ если } i = (m+1), \dots, n.$$

5.3. Исходные данные приведены в таблице 8.

Таблица 8

№ вар.	Масштабный усилитель		Сумматор $\underline{U}_2 = a_1 \cdot \underline{U}_{11} + a_2 \cdot \underline{U}_{12}$				Интегратор (дифференциатор)		
	Z_1	Z_2	a_1	a_2	$\underline{U}_{11}, \text{В}$	$\underline{U}_{12}, \text{В}$	Цепь	C	R
1	R_1	R	$-R/R_1$	$-R/R_2$	1,0	0,5	инт.	C	R_1
2	R_2	R	$-R/R_2$	$-R/R_1$	0,9	0,6	дифф.	C_1	R
3	R_3	R	$-R/R_1$	$-R/R_2$	0,8	0,7	инт.	C	R_2
4	R_4	R	$-R/R_2$	$-R/R_1$	0,7	0,8	дифф.	C_2	R
5	R_1	R	$-R/R_1$	$-R/R_2$	0,6	0,9	инт.	C	R_3
6	R_2	R	$-R/R_2$	$-R/R_1$	0,5	1,0	дифф.	C_1	R
7	R_3	R	$-R/R_1$	$-R/R_2$	0,4	0,2	инт.	C	R_4
8	R_4	R	$-R/R_2$	$-R/R_1$	0,5	0,3	дифф.	C_2	R
9	R_1	R	$-R/R_1$	$-R/R_2$	0,6	0,4	инт.	C	R_1
10	R_2	R	$-R/R_2$	$-R/R_1$	0,7	0,3	дифф.	C_1	R
11	R_3	R	$-R/R_1$	$-R/R_2$	0,8	0,4	инт.	C	R_2
12	R_4	R	$-R/R_2$	$-R/R_1$	0,9	0,5	дифф.	C_2	R

5.4. Схемы интегратора и дифференциатора приведены на рис. 9 (а и б), соответственно.

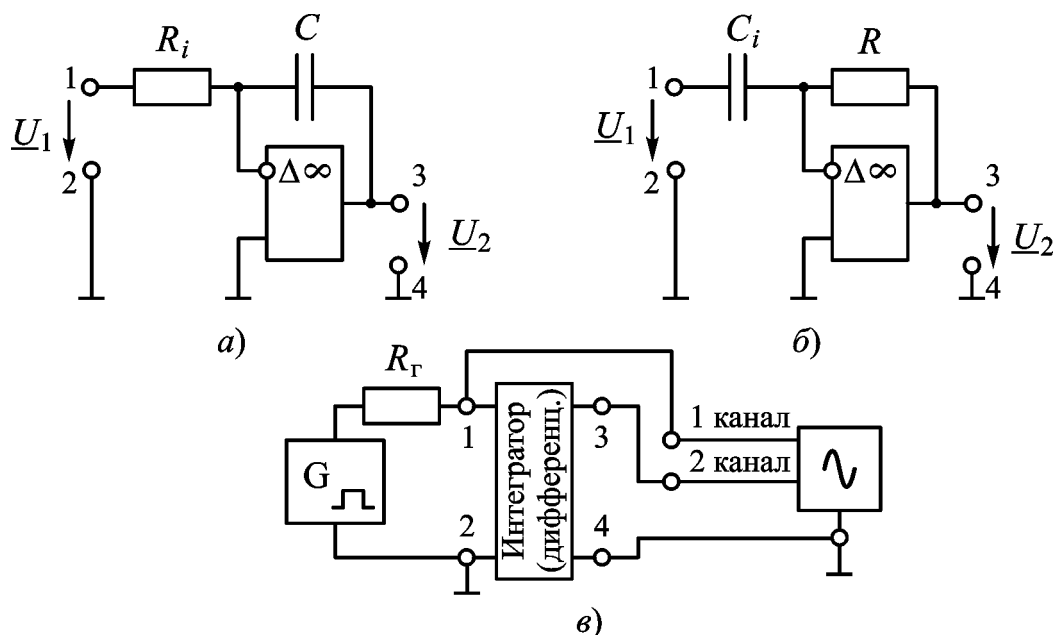


Рис. 9

Значения элементов приведены в таблице 9.

Примечание: Значения R_i и C_i выбираются в соответствии с вариантом (таблица 8). В случае интегратора $R_i = R_1, R_2, R_3, R_4$; в схеме дифференциатора $C_i = C_1, C_2$.

Таблица 9

R , кОм	R_1 , кОм	R_2 , кОм	R_3 , кОм	R_4 , кОм	R_0 , кОм	C , мкФ	C_1 , мкФ	C_2 , мкФ
1,2	3,2	5,6	4,2	5,2	1,2	0,1	0,047	0,1

6. Контрольные вопросы

6.1. Чему равно входное сопротивление цепи, построенной по схеме включения ОУ с инвертирующим входом? С неинвертирующим входом?

6.2. Начертить схему пассивного интегратора и дифференциатора.

6.3. В чем заключается преимущество активного интегратора (дифференциатора) по сравнению с пассивным.

6.4. Построить схему сумматора и определить ее элементы, если $\underline{U}_2 = -0,5 \cdot U_{11} + 2 \cdot U_{12} - 1,5 \cdot U_{13}$.

6.5. Операционный усилитель включен по схеме с инвертирующим входом. Определить передаточную функцию такой цепи, если в качестве \underline{Z}_2 используется параллельный контур RC , в качестве \underline{Z}_1 – последовательный контур RC .

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 14

«НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ ПОСТОЯННОГО ТОКА»

1. Цель работы: изучение методов расчета нелинейных цепей постоянного тока при последовательном, параллельном и смешанном соединении линейных и нелинейного элементов.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Для двух схем – последовательного соединения линейных и нелинейного (НЭ) элементов (рис. 10) и смешанного соединения линейных и нелинейного элементов (рис. 11) рассчитать токи в ветвях и напряжения на всех элементах схемы, пользуясь методом графического сложения вольтамперных характеристик и методом эквивалентного генератора.

вольтамперная характеристика диода:

$U_{\text{НЭ}}, \text{В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8	0,9
$I_{\text{НЭ}}, \text{мА}$	0	0	0	0,02	0,12	0,81	3,7	9,8	18,1	37,5	58,7	80,6

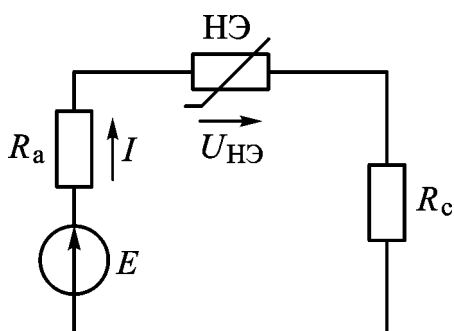


Рис. 10

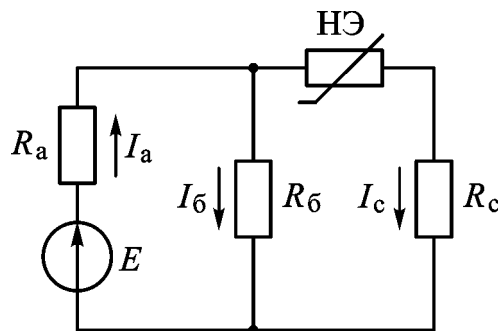


Рис. 11

3. Экспериментальная часть

3.1. В качестве нелинейного элемента (НЭ) используется полупроводниковый диод diode17 (из библиотеки lab17). Снять вольтамперную характеристику диода (рис. 10).

Примечание. Значения ЭДС E изменять от 0 до 1 В с шагом 0,1 В. Для измерения тока I в цепи и напряжения $U_{\text{НЭ}}$ на НЭ используются соответственно амперметр и вольтметр. Измерительные приборы используются в режиме постоянного тока («DC»). Показания приборов занести в таблицу 10.

Таблица 10

$E, \text{В}$	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0
$U_{\text{НЭ}}, \text{В}$											
$I, \text{мА}$											

3.2. Значения ЭДС E , сопротивлений R_a , R_b , R_c даны в таблице 12 и выбираются в зависимости от номера варианта.

3.3. Собрать схему последовательного соединения линейных и нелинейного элементов (рис. 10), установив заданные значения элементов цепи.

3.4. С помощью вольтметра измерить величину ЭДС источника E и напряжений на элементах цепи (R_a , R_c и НЭ) и записать их значения в таблицу 11.

3.5. С помощью амперметра измерить ток в цепи и записать в табл. 11.

3.6. Используя полученную ВАХ НЭ (таблица 10), определить токи в ветвях и напряжения на всех элементах схемы (рис. 10) методом эквивалентного генератора. Записать результаты расчетов в таблицу 11. Сравнить результаты расчета с экспериментальными данными и сделать вывод о точности графоаналитического метода расчета цепи постоянного тока с нелинейным элементом.

3.7. Собрать схему смешанного соединения линейных элементов и НЭ (рис. 11), установив заданные значения элементов цепи. Повторить измерения и необходимые расчеты по п.п. 3.4-3.6.

Результаты расчета и измерений записать в таблицу 11.

Проверить правильность расчетов по 1-му и 2-му законам Кирхгофа и записать значения токов и напряжений в таблицу 11.

Таблица 11

		E , В	U_a , В	U_b , В	U_c , В	$U_{НЭ}$, В	I_a , мА	I_b , мА	I_c , мА
Послед. соедин. (рис. 10)	Расчет								
	Измер.								
Смешан. соедин. (рис. 11)	Расчет								
	Измер.								

4. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

4.1. Вольтамперную характеристику цепи, построенную в удобном для работы масштабе.

4.2. Исходную схему и выполненный графоаналитическим методом предварительный расчет схем последовательного и смешанного соединения линейных и нелинейного элементов (рис. 10, 11).

4.3. Таблицу 11 расчетных и экспериментальных данных.

4.4. Выводы по проделанной работе.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Вольтамперные характеристики линейных и нелинейных элементов.
5.2. Статические и динамические параметры нелинейных элементов.
5.3. Расчет электрической цепи при последовательном, параллельном и смешанном соединении линейных и нелинейных элементов.
5.4. Изменение режима работы цепи при изменении полярности источника E или полярности включения нелинейного элемента (диода).

6. Приложение

Исходные данные для предварительного расчета приведены в таблице 12.

Таблица 12

Вариант	R_a , Ом	R_b , Ом	R_c , Ом	E , В
1	10	100	10	Для всех вариантов рис.10 $E = 0,7$ В рис.11 $E = 1$ В
2	15	100	10	
3	20	100	10	
4	10	150	10	
5	15	150	10	
6	20	150	10	
7	10	200	10	
8	15	200	15	
9	20	200	15	
10	10	100	15	
11	15	100	15	
12	20	100	15	
13	10	150	15	
14	15	150	15	
15	20	150	20	
16	10	200	20	
17	15	200	20	
18	20	200	20	
19	10	100	20	
20	15	100	20	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 15

«НЕЛИНЕЙНЫЕ ЦЕПИ В РЕЖИМЕ ГАРМОНИЧЕСКИХ КОЛЕБАНИЙ»

1. **Цель работы:** изучение расчета цепи переменного тока с нелинейным элементом методом угла отсечки при кусочно-линейной аппроксимации ВАХ.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Для электрической цепи (рис. 12) заданы следующие величины (табл. 15):

- тип нелинейного элемента (тип диода);
- вольтамперная характеристика диода (табл. 13);
- напряжение смещения входного сигнала U_0 ;
- амплитуда U_m и частота f переменного напряжения;
- значение сопротивления нагрузки R_H диода.

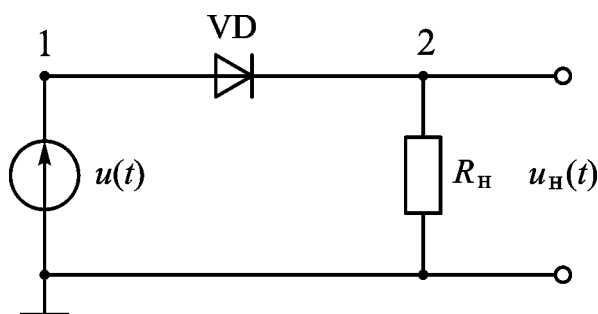


Рис. 12

Таблица 13

$U_{HЭ}$, В	0	0,1	0,2	0,3	0,4	0,45	0,5	0,55	0,6	0,7	0,8	0,9
$I_{HЭ}$, мА	0	0	0	0,02	0,12	0,81	3,7	9,8	18,1	37,5	58,7	80,6

2.2. Считая, что на входе цепи (последовательное соединение VD и R_H) действует напряжение

$$u(t) = U_0 + U_m \cos \omega t,$$

- построить общую вольтамперную характеристику последовательно соединенных диода VD и сопротивления нагрузки R_H ;
- произвести кусочно-линейную аппроксимацию построенной вольтамперной характеристики;

- по напряжению отсечки $U_{\text{отс}}$, заданному напряжению смещения U_0 и амплитуде входного напряжения U_m рассчитать угол отсечки θ ;
- графически определить форму импульсов тока $i(t)$ и амплитуду импульсов тока I_{max} и напряжения на нагрузке $U_{\text{н max}}$, где

$$U_{\text{н max}} = I_{\text{max}} \cdot R_{\text{н}} (\text{В});$$

- определить амплитуды 1-ой, 2-ой, 3-ей гармоник и постоянной составляющей напряжения на нагрузке по формуле:

$$U_{mi} = U_{\text{н max}} \cdot \alpha_i(\theta),$$

где $\alpha_i(\theta) = \frac{\gamma_i(\theta)}{1 - \cos \theta}$ – коэффициенты Берга;

$$\alpha_0 = \frac{\sin \theta - \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)};$$

$$\alpha_1 = \frac{\theta - \sin \theta \cos \theta}{\pi(1 - \cos \theta)};$$

$$\alpha_2 = \frac{2 \sin^3 \theta}{3\pi(1 - \cos \theta)};$$

$$\alpha_3 = \frac{\sin 3\theta \cos \theta - 3 \cos 3\theta \sin \theta}{12\pi(1 - \cos \theta)}.$$

- построить амплитудный спектр импульсов напряжения $u(t)$ в масштабе.
- данные всех расчетов занести в таблицу 14.

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать схему последовательного соединения VD и $R_{\text{н}}$ (рис. 12), установив заданные значения элементов цепи.

Примечание. В качестве источника входного напряжения используется функциональный генератор в режиме синусоидального напряжения. Значение частоты f переменного напряжения выставляется в окошке FREQUENCY; значение амплитуды U_m – в окошке AMPLITUDE; значение смещения U_0 – в окошке OFFSET. Десятые доли величин вводятся через запятую.

3.2. Подключить канал А осциллографа к точке 1 (рис. 12). Включить схему. Убедиться, что изображение входного сигнала на экране осциллографа соответствует заданному.

3.3. Подключить осциллограф к точке 2 схемы (рис. 12). По осциллограмме определить амплитуду выходного сигнала $U_{\text{н max}}$.

3.4. Зарисовать форму выходного сигнала.

3.5. По изображению выходного сигнала на экране осциллографа определить угол отсечки θ по формуле:

$$\theta = \frac{\tau_n}{T} \cdot 180^\circ (\text{град}),$$

Таблица 14

θ (рассч.)	θ (из- мер.)	$U_{н\max},$ В (рассч.)	$U_{н\max},$ В (из- мер.)	α_0	$U_0,$ В	α_1	$U_{m1},$ В	α_2	$U_{m2},$ В	α_3	$U_{m3},$ В

где τ_n – длительность импульса выходного сигнала у основания; T – период следования сигнала.

Значения $U_{н\max}$ и θ занести в таблицу 14.

3.6. Подключить параллельно к нагрузке конденсатор $C = 1$ мкф («сглаживающий конденсатор»), зарисовать форму выходного напряжения $u(t)$. Проанализировать полученные результаты.

3.7. Установить значение конденсатора $C = 4,7$ мкф, зарисовать форму выходного напряжения $u(t)$. Проанализировать полученные результаты.

4. Требования к отчету

Отчет по лабораторной работе должен содержать:

- 4.1. Таблицу вольтамперной характеристики заданного диода.
- 4.2. Графики вольтамперной характеристики диода, входного напряжения и напряжения на нагрузке в схеме на рис. 12.
- 4.3. Требуемый предварительный расчет с результатами, записанными в таблицу 14.
- 4.4. Графики и результаты экспериментальных измерений и расчетов.
- 4.5. Выводы по проделанной работе.

5. Контрольные вопросы

5.1. Принцип полиномиальной аппроксимации. Методы расчета цепи переменного тока с нелинейным элементом при полиномиальной аппроксимации его ВАХ.

5.2. Принцип кусочно-линейной аппроксимации. Метод расчета цепи переменного тока с нелинейным элементом при кусочно-линейной аппроксимации его ВАХ.

5.3. Амплитудный спектр тока в цепи и напряжения на нагрузке при полиномиальной и кусочно-линейной аппроксимации.

5.4. Угол отсечки θ , его зависимость от напряжения смещения, амплитуды сигнала.

5.5. Коэффициенты разложения («коэффициенты Берга»). Их зависимость от угла отсечки θ .

5.6. Влияние элементов (L , C), подключаемых последовательно или параллельно нагрузке, на форму напряжения на нагрузке $u(t)$ и его амплитудный спектр.

6. Приложение

Исходные данные для предварительного расчета приведены в таблице 8.

Таблица 15

Вариант	Тип НЭ	R_H , Ом	U_0 , В	U_m , В	f
1	Для всех вариантов диод – diode17 (из библиотеки lab17). (ВАХ диода табл. 13)	100	+0,3	1,5	Для всех вариантов $f = 1$ кГц
2		100	+0,3	1,8	
3		100	+0,3	2,0	
4		100	+0,3	2,3	
5		100	+0,3	2,5	
6		200	−0,3	2,0	
7		200	−0,3	2,3	
8		200	−0,3	2,5	
9		200	−0,3	2,8	
10		200	−0,3	3,0	
11		300	−0,5	2,3	
12		300	−0,5	2,5	
13		300	−0,5	2,8	
14		300	−0,5	3,0	
15		300	−0,5	3,3	
16		400	+0,2	1,8	
17		400	+0,2	2,0	
18		400	+0,2	2,3	
19		400	−0,2	2,5	
20		400	−0,2	2,8	

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 16

«RC-АВТОГЕНЕРАТОР С МОСТОМ ВИНА В ЦЕПИ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ»

1. **Цель работы:** экспериментальное исследование работы автогенератора, содержащего операционный усилитель и RC-цепь обратной связи.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

В работе исследуется автогенератор, схема которого приведена на рис. 13.

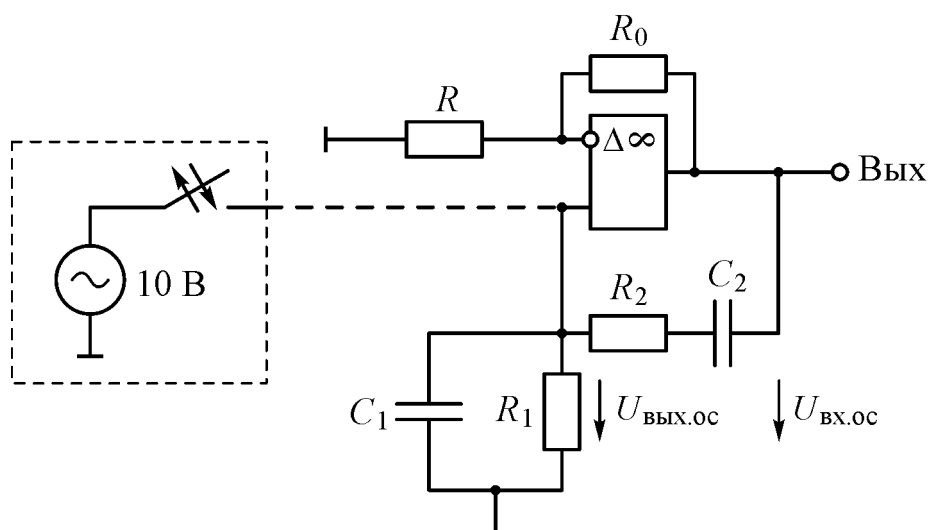


Рис. 13

В качестве усилителя использован операционный усилитель (ОУ) с положительной обратной связью, коэффициент усиления которого определяется по формуле:

$$H_{yc} = 1 + R_0/R.$$

В качестве 4-х полюсника обратной связи использован так называемый мост Вина (рис. 14).

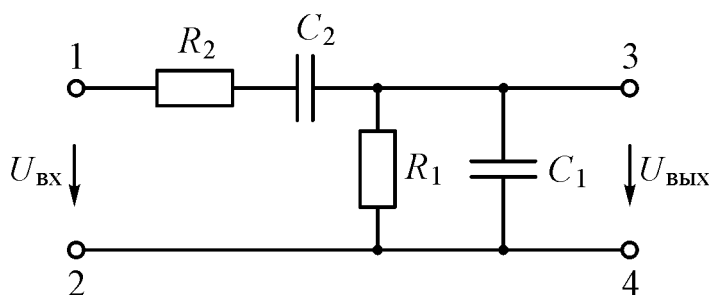


Рис. 14

Передаточная функция 4-х полюсника обратной связи определяется по формуле:

$$H_{oc}(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1} + \frac{C_1}{C_2} + j\left(R_2 C_1 \omega - \frac{1}{C_2 R_1 \omega}\right)}.$$

При подготовке к работе в соответствии с исходными данными (см. приложение) требуется:

- рассчитать частоту генерации f_g ;
- найти H_{oc} на частоте генерации;
- вычислить требуемый коэффициент усиления H_{yc} операционного усилителя, необходимый для самовозбуждения генератора. Для полученного H_{yc} вычислить R_0 , приняв $R = 1$ кОм;
- рассчитать АЧХ и ФЧХ 4-х полюсника обратной связи в диапазоне $(0,2 \div 4)$ кГц (включая f_g). Результаты записать в таблицу 16. Построить графики АЧХ и ФЧХ. Убедиться, что на частоте генерации f_g выполняется баланс амплитуд ($H_{yc} \cdot H_{oc} = 1$) и баланс фаз ($\varphi_{oc} + \varphi_{yc} = 0$).

Таблица 16

f , кГц	0,2	f_g	4
H_{oc}					
φ_{oc}°					

3. Экспериментальная часть

3.1. Исследовать амплитудно-частотную и фазочастотную характеристики 4-х полюсника обратной связи с помощью Bode Plotter, для чего:

- на вход 4-х полюсника обратной связи (рис. 14) подключить генератор синусоидальных сигналов с напряжением $U_{12} = 1$ В;
- гнезда IN прибора подключить ко входу, OUT – к выходу четырехполюсника (рис. 15);

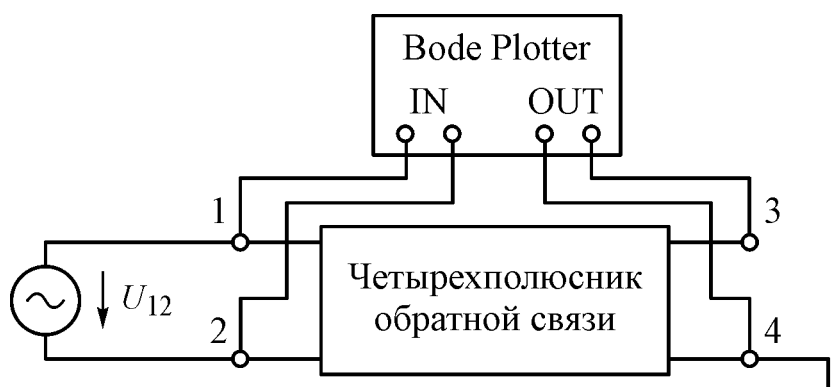


Рис. 15

– результаты измерений записать в таблицу 17. Построить графики $H_{oc}(f)$ и $\varphi_{oc}(f)$, сравнить с рассчитанными.

Таблица 17

f , кГц	0,2	f_T	4
H_{oc}					
$\varphi_{oc}, ^\circ$					

3.2. Исследовать работу RC -автогенератора, для чего:

– собрать схему автогенератора (рис. 13) в соответствии с исходными и расчетными данными. Установить заданное значение R и вычисленное R_0 ;

– подключить осциллограф к выходу автогенератора. Для запуска генератора кратковременно (через ключ) подать сигнал от генератора переменного напряжения $U = 10$ В с частотой f_T на неинвертирующий вход ОУ. Записать осциллограмму полученного напряжения. Оно должно иметь синусоидальную форму. В противном случае, незначительно изменяя величину R_0 , подобрать такой коэффициент усиления H_{yc} , при котором кривая станет синусоидальной;

Примечание. Масштаб по горизонтальной оси выбрать так, чтобы на экране размещался один период автоколебаний.

– измерить период полученных автоколебаний. Вычислить частоту генерации $f_T = 1/T$, сравнить с рассчитанной, измерить амплитудное значение сигнала;

– вольтметром измерить действующее значение полученного напряжения;

– убедиться в том, что при уменьшении H_{yc} колебания срываются (то есть не выполняется баланс амплитуд), а при увеличении H_{yc} колебания искажаются и отличаются по форме от синусоидальных (это объясняется отсутствием избирательной системы в схеме RC -автогенератора – колебательного контура).

4. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

4.1. Схему исследуемого автогенератора, исходные данные.

4.2. Предварительный расчет, таблицу 16, графики АЧХ и ФЧХ 4-х полюсника обратной связи.

4.3. Результаты измерений АЧХ 4-х полюсника обратной связи (таблица 17), графики АЧХ и ФЧХ.

4.4. Осциллограмму напряжения на выходе генератора (в масштабе).

4.5. Измеренные параметры (f_T , $U_{вых}$) автоколебания.

4.6. Выводы по работе.

5. Контрольные вопросы

- 5.1. Изобразите принципиальные схемы RC -автогенераторов:
- а) с мостом Вина;
 - б) с тремя фазосдвигающими цепочками.
- 5.2. Запишите условия самовозбуждения каждого типа (п. 5.1) генераторов.
- 5.3. Как определить частоту генерации каждого (п. 5.1) RC -генератора.
- 5.4. Приведите вывод формул для $H_{oc}(j\omega)$ и H_{yc} .
- 5.5. Назовите преимущества и недостатки RC -генераторов.

6. Приложение

6.1. Исходные данные для предварительного расчета приведены в таблице 18.

Таблица 18

Вариант	C_1 , нФ	C_2 , нФ	R_1 , кОм	R_2 , кОм
1	7,4	7,5	9,9	9,9
2	6,9	7,0	9,9	19,1
3	7,1	6,2	9,9	47,3
4	7,3	6,4	18,4	9,9
5	6,1	6,7	19	18,6
6	7,1	6,6	18,0	46,9
7	7,4	7,2	47,0	9,9
8	6,4	6,8	46,8	18,5
9	7,0	6,8	47,2	44,7
10	6,4	7,3	9,6	9,9
11	7,2	7,2	9,9	19,0
12	7,4	7,4	18,1	48,0
13	7,0	6,9	18,2	9,9
14	6,2	7,1	18,3	18,3
15	6,7	7,3	47,0	47,2
16	6,6	6,1	48,2	9,9
17	7,2	7,1	47,4	18,3
18	6,8	7,4	9,9	47,2
19	6,8	6,4	9,6	9,9
20	7,3	7,0	9,8	18,3

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 17

«ИССЛЕДОВАНИЕ АКТИВНЫХ RC-ФИЛЬТРОВ»

1. **Цель работы:** исследование амплитудно-частотных характеристик фильтра нижних частот, реализованного на пассивных и активных RC-звеньях.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

2.1. Изучить по учебной литературе теорию электрических фильтров и методику их синтеза (см. список литературы и раздел «Приложение»).

2.2. Осуществить синтез ARC-фильтра нижних частот в соответствии с исходными данными своего варианта (табл. 21), для чего:

– выполнить нормирование:

$$\Omega_3 = \frac{f_3}{f_2};$$

– пользуясь графиками (вначале рис. 19, а затем рис. 20, а), определить порядок передаточной функции n (применяем аппроксимирующий полином Чебышева, значение n следует округлить до целого числа в большую сторону);

– из таблицы 20 выписать нормированные полюсы передаточной функции:

$$S_1 = -\sigma_1; \quad S_{2,3} = -\sigma_2 \pm j\Omega_2, \quad \text{если } n = 3;$$

– для комплексно-сопряженной пары полюсов $S_{2,3}$ определить добротность Q и частоту полюса Ω_n :

$$Q = \frac{\sqrt{\sigma_2^2 + \Omega_2^2}}{2\sigma_2}; \quad \Omega_n = \sqrt{\sigma_2^2 + \Omega_2^2}; \quad (1)$$

– сформировать нормированную передаточную функцию фильтра:

$$H(S) = \frac{\sigma_1}{S + \sigma_1} \cdot \frac{\sigma_2^2 + \Omega_2^2}{S^2 + 2\sigma_2 \cdot S + \sigma_2^2 + \Omega_2^2} = \frac{\sigma_1}{S + \sigma_1} \cdot \frac{\Omega_n^2}{S^2 + \frac{\Omega_n}{Q} S + \Omega_n^2}; \quad (2)$$

– осуществить денормирование, подставляя в (2)

$$S = \frac{P}{2\pi \cdot f_2},$$

где f_2 – граничная частота полосы эффективного пропускания.

Итак, получена передаточная функция фильтра нижних частот в виде произведения двух сомножителей:

$$H(P) = H_1(P) \cdot H_2(P) = \frac{b_1}{P + a_1} \cdot \frac{b_2}{P^2 + a_2P + a_{20}}. \quad (3)$$

Реализовать полученную $H(P)$ в виде каскадного соединения звеньев 1-го и 2-го порядка, используя схемы рис. 17, б и рис. 17, а, соответственно.

Для определения элементов звена 1-го порядка составить уравнение:

$$a_1 = \frac{1}{RC}. \quad (4)$$

Для определения элементов звена 2-го порядка составить систему уравнений:

$$\begin{cases} a_2 = \frac{1}{R_1 C_1}, \\ a_{02} = \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}. \end{cases} \quad (5)$$

Задаться значением $C_1 = C_2 = C = 1,5$ нФ и определить R, R_1, R_2 .

2.3. Привести полную схему фильтра.

2.4. Построить (качественно) характеристики $|H(jf)|$ и ослабления $A(f)$ каждого звена и всего фильтра.

Примечание: АЧХ фильтрового звена второго порядка приведена на рис. 20, б. Предварительно рассчитайте величины f', f'' и H_{\max} .

3. Экспериментальная часть

3.1. Исследовать частотные характеристики пассивного RC-звена, для чего:

- собрать схему пассивного звена RC-фильтра;
- на вход подать сигнал от генератора синусоидальных сигналов с напряжением $U = 1$ В и, подключив к выходным и входным гнездам звена измеритель частотных характеристик «Vode Plotter», измерить частотные характеристики $H(f)$ и $A(f)$, дБ.

Примечание:

при выборе частот для измерения включите частоты f' и f'' (см. рис. 20, б), а также частоты, соответствующие максимумам и минимумам ослабления в полосе пропускания фильтра $\Omega_{\max} = 0,5$, $\Omega_{\min} = 0,866$, рассчитанные по формулам:

$$f_{\max} = f_2 \cdot \Omega_{\max} \quad \text{и} \quad f_{\min} = f_2 \cdot \Omega_{\min}.$$

3.2. Исследовать частотные характеристики ARC -звена второго порядка « $ARC2$ », для чего: установить расчетные значения элементов, подключить генератор синусоидальных сигналов с напряжением 1 В ко входу ARC -звена, а «Bode Plotter» к его выходу и входу и измерить частотные характеристики $H(f)$ и $A(f)$. Сравнить экспериментальное значение H_{\max} (при $f = f'$) (см. рис. 20, б) с предварительно рассчитанным.

3.3. Исследовать частотные характеристики ФНЧ третьего порядка, для чего: соединить звенья 1-го и 2-го порядка каскадно друг с другом через повторитель (см. рис. 17, в, рис. 21) и аналогично тому, как это делалось в п.п. 3.1 и 3.2, измерить его частотные характеристики. Обратить внимание на то, отвечают ли полученные характеристики заданным требованиям.

Результаты всех измерений по п.п. 3.1, 3.2, 3.3 занеси в таблицу 19.

Таблица 19

<div style="display: inline-block; transform: rotate(-45deg);"> F, кГц Тип фильтры </div>		0										
		0		f_{\max}				f_{\min}		f_2		f_3
Пасс. звено	H											
	A , дБ											
Акт. звено	H											
	A , дБ											
ФНЧ 3-го пор.	H											
	A , дБ											

4. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 4.1. Предварительные расчеты, выполненные в соответствии с п. 2.3.
- 4.2. Схему полученного фильтра и значения ее элементов.
- 4.3. Примерный вид кривых $H(f)$ и $A(f)$ отдельно для каждого звена и фильтра в целом.
- 4.4. Результаты эксперимента, оформленные в виде табл. 19.
- 4.5. Графики $H(f)$ и $A(f)$, построенные по результатам эксперимента отдельно для каждого звена и всего фильтра.
- 4.6. Выводы по работе.

5. Приложение

Краткие сведения.

Синтез любого типа фильтра – ФНЧ, ФВЧ, ПФ, ЗФ сводится к синтезу фильтра-прототипа (ФНЧ с единичной граничной частотой), если применить

метод преобразования частот. Поэтому начальный этап синтеза фильтра состоит в нормировании по частоте. На рис. 16 на примере ФНЧ показан переход от заданных норм на ФНЧ (рис. 16, а) к нормам на фильтр-прототип (16, б). Соотношения нормированных и ненормированных комплексных частот определяется для ФНЧ выражением:

$$S_{\text{нч}} = \frac{P}{\omega_2}.$$

Для реальных частот эта формула принимает вид:

$$\Omega_{\text{нч}} = \frac{\omega}{\omega_2} = \frac{f}{f_2}. \quad (6)$$

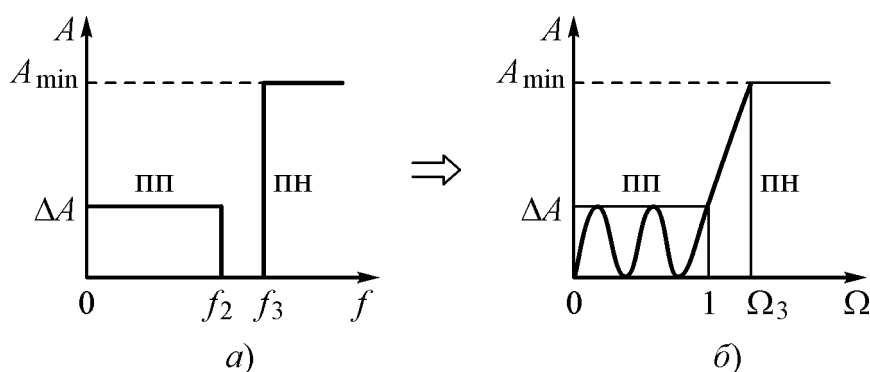


Рис. 16

Синтез электрического фильтра включает в себя решение задач аппроксимации и реализации. Задача аппроксимации заключается в том, чтобы определить передаточную функцию фильтра, АЧХ которого удовлетворяет заданным нормам: например, кривая, показанная на рис. 16, б.

Для решения задачи аппроксимации применяются различные типы функции: полином Чебышева, полином Баттерворта, дробь Чебышева и др. Задача аппроксимации решается, как правило, с применением справочных данных в виде графиков и таблиц.

Полученная передаточная функция в случае синтеза АРС-фильтров записывается в виде произведения простейших (первого и второго порядков) сомножителей и денормируется, т.е. осуществляется переход к реальным частотам. Затем решается задача реализации, т.е. построение схемы фильтра и расчет ее элементов. При этом каждый сомножитель передаточной функции реализуется в виде звеньев 1-го и 2-го порядка, которые затем соединяются каскадно.

Звено 1-го порядка чаще выбирают пассивным. В данной работе предлагается схема, приведенная на рис. 17, б.

Передаточная функция этого звена определяется следующим образом:

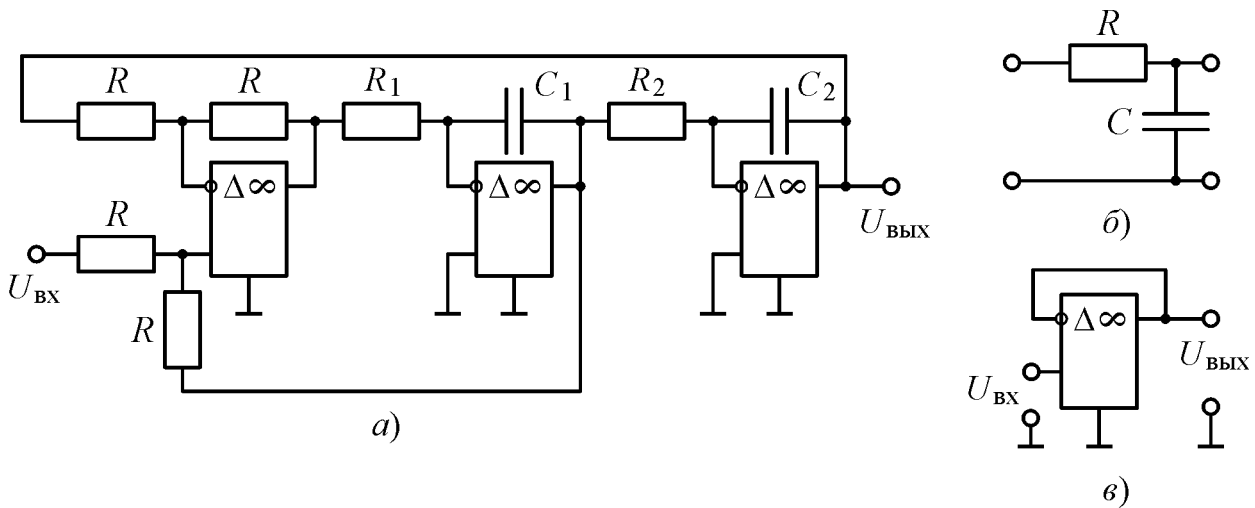


Рис. 17

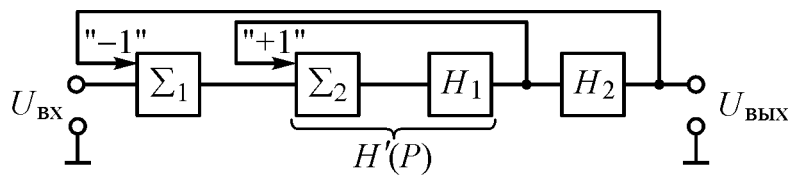


Рис. 18

$$H(P) = \frac{u_2(P)}{u_1(P)} = \frac{1/(PC)}{R + \frac{1}{PC}} = \frac{1/(RC)}{P + \frac{1}{RC}}. \quad (7)$$

Выбор типа звена 2-го порядка осуществляется в соответствии с его требуемой добротностью, которая определяется добротностью соответствующего полюса передаточной функции:

$$Q_i = \frac{\sqrt{\alpha_i^2 + \omega_i^2}}{2\alpha_i}, \quad (8)$$

где α_i и ω_i – вещественная и мнимая части полюса

$$P_i = \alpha_i + j\omega_i.$$

В данной работе предлагается схема, приведенная на рис. 17, а.

Примечание:

При построении схемы ФНЧ 3-го порядка вначале включается звено 1-го порядка, а каскадно за ним звено 2-го порядка.

Приведем вывод выражения передаточной функции звена 2-го порядка.

Рассматривая звено как цепь с обратными связями, можно представить ее в виде (рис. 18) каскадного соединения двух сумматоров и двух интеграторов.

Тогда

$$H(P) = \frac{H_{yc}(P)}{1 - H_{yc}(P) \cdot (-1)}, \quad (9)$$

где

$$H_{yc}(P) = H'(P) \cdot H_2(P). \quad (10)$$

Но, как известно,

$$H'(P) = \frac{H_1(P)}{1 - H_1(P) \cdot 1}; \quad (11)$$

$$H_1(P) = -\frac{1}{PR_1C_1}; \quad (12)$$

$$H_2(P) = -\frac{1}{PR_2C_2}. \quad (13)$$

Подставляя (12) в (13), получаем

$$H'(P) = -\frac{\frac{1}{PR_1C_1}}{1 + \frac{1}{PR_1C_1}}. \quad (14)$$

Далее, подставляя (14) в (10) и, наконец, (10) в (9), получим

$$H(P) = -\frac{\frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}{P^2 + P \cdot \frac{1}{R_1C_1} + \frac{1}{R_1R_2C_1C_2}}. \quad (15)$$

Полюсы передаточной функции НЧ-прототипа приведены в табл. 20.

Таблица 20

$\begin{matrix} n \\ A, \\ \text{дБ} \end{matrix}$	2	3	4
0,2	$-0,963543 \mp j1,195163$	$-0,814634 - 0,407317 \mp j1,11701$	$-0,542741 \mp j0,443831 - 0,224810 \mp j1,071505$
0,5	$-0,712812 \mp j1,004043$	$-0,626457 - 0,313228 \mp j1,021928$	$-0,175353 \mp j1,016253 - 0,423340 \mp j0,420946$
1,0	$-0,548867 \mp j0,895129$	$-0,494171 - 0,247085 \mp j0,965999$	$-0,139536 \mp j0,983379 - 0,336870 \mp j0,407329$
3,0	$-0,321797 \mp j0,776887$	$-0,29862 - 0,14931 \mp j0,903813$	$-0,205222 \mp j0,392010 - 0,085006 \mp j0,946398$

Исходные данные приведены в табл. 21.

Таблица 21

Вариант	ΔA , дБ	A_{\min} , дБ	f_2 , кГц	f_3 , кГц
1	3,0	35	20	54
2	1,0	30	25	62,5
3	0,5	25	30	79
4	0,2	20	15	37,5
5	3,0	32	20	50
6	1,0	28	25	65
7	0,5	23	30	81
8	0,2	21	15	42
9	3,0	33	20	53
10	1,0	29	25	68,7
11	0,5	24	30	81
12	0,2	19	15	33
13	3,0	34	20	58
14	1,0	27	25	65
15	0,5	26	30	84
16	0,2	22	15	25,5
17	3,0	36	20	60
18	1,0	26	25	57,5
19	0,5	22	30	72
20	0,2	20,5	15	36,7
21	3,0	38	20	70
22	1,0	25	25	50
23	0,5	24,5	30	78
24	0,2	21,5	15	46,5
25	3,0	37	20	64
26	1,0	28,5	25	67,5
27	0,5	26,5	30	87
28	0,2	22,3	15	41,2

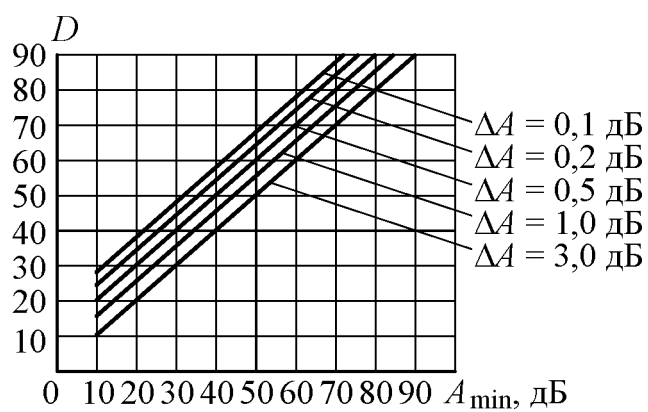


Рис. 19

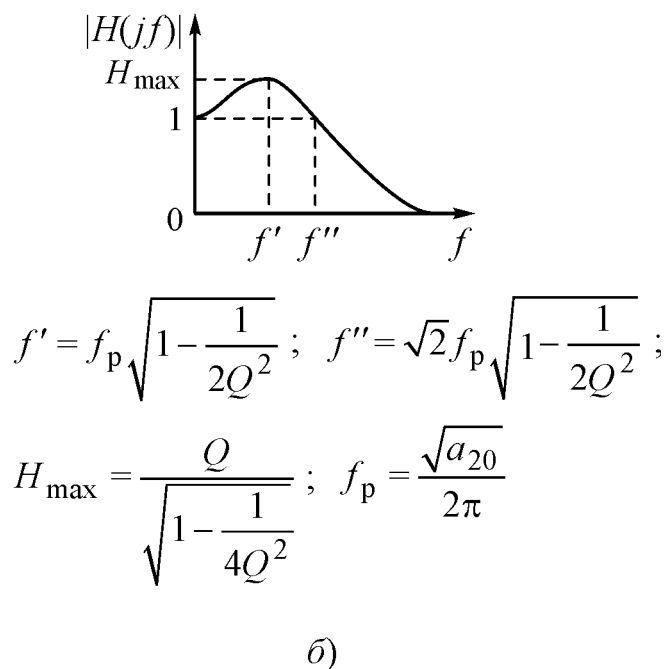
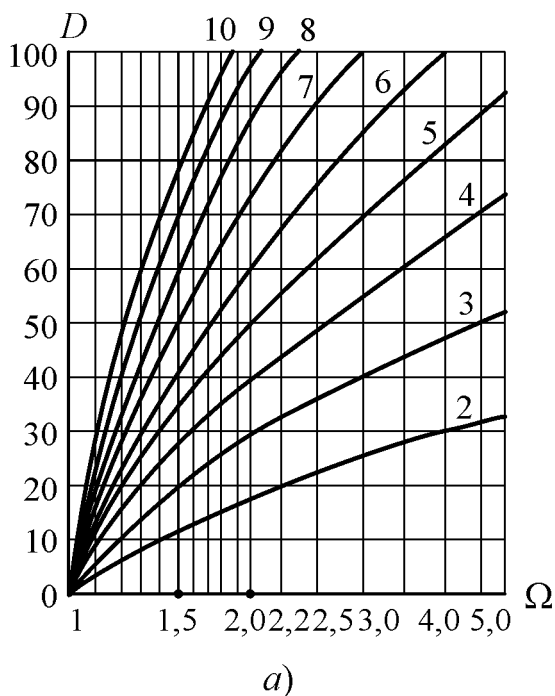


Рис. 20

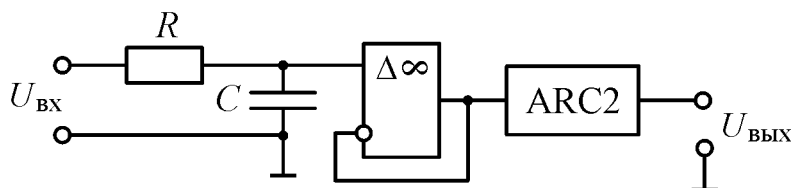


Рис. 21

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Что такое электрический фильтр? Какие типы фильтров Вы знаете?
- 6.2. С какой целью решается задача аппроксимации при синтезе электрического фильтра?
- 6.3. Какие функции используются в качестве аппроксимирующих?
- 6.4. Чем отличаются функции и соответствующие им частотные характеристики при использовании полиномиальной и дробной аппроксимирующей функции?
- 6.5. От чего зависит порядок аппроксимирующей функции (фильтра)?
- 6.6. В чем преимущества и недостатки полиномиальных фильтров Баттерворта и Чебышева?
- 6.7. Каковы свойства полинома Гурвица?
- 6.8. Какие методы реализации Вы знаете, какая элементная база при этом используется?
- 6.9. В чем заключается особенность реализации ARC-фильтров? Их достоинства и недостатки?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА 18

«ИССЛЕДОВАНИЕ АМПЛИТУДНОГО КОРРЕКТОРА»

1. **Цель работы:** расчет и экспериментальное исследование амплитудных корректоров.

2. Подготовка к выполнению лабораторной работы

При подготовке к выполнению работы необходимо:

2.1. Изучить теорию и метод расчета амплитудных корректоров (см. Приложение).

2.2. Рассчитать в соответствии с заданным вариантом (таблица 23) элементы корректора.

2.3. Рассчитать частотные характеристики ослабления корректора – требуемую $A_{\text{кт}}(f)$ и расчетную $A_{\text{кр}}(f)$ в диапазоне частот, указанном в табл. 23. Результаты расчета записать в табл. 22 и построить на одном рисунке кривые $A_{\text{кт}}(f)$ и $A_{\text{кр}}(f)$.

Примечание:

- Метод расчета корректора дан в приложении данной работы.
- Расчет характеристики ослабления корректора производится на 11 частотах в заданном диапазоне 0–50 кГц.

3. Экспериментальная часть

3.1. Собрать схему амплитудного корректора.

3.2. Измерить входное сопротивление корректора $Z_{\text{вх}}$ в рабочем диапазоне частот при заданном сопротивлении нагрузки $R_0 = 200$ Ом. Результаты измерений записать в таблицу 22.

Примечание: для измерения входного сопротивления используется Bode Plotter.

3.3. Измерить ослабление корректора в рабочем диапазоне частот $A_{\text{к изм}}(f)$ и результаты записать в таблицу 22.

3.4. Построить графики $Z_{\text{вх}}(f)$ и $A_{\text{к изм}}(f)$. График $A_{\text{к изм}}(f)$ построить на том же рисунке, что и $A_{\text{кт}}(f)$ и $A_{\text{кр}}(f)$.

3.5. Собрать схему амплитудного корректора, содержащего 4 реактивных элемента (по заданию преподавателя) и измерить ослабление в том же диапазоне частот, что и в п. 3.3. Кроме того, необходимо рассчитать резонансную частоту последовательного контура и включить ее в число измеряемых частот. Построить график $A_{\text{к}}(f)$.

Примечание:

– Измерение $Z_{\text{вх}}$ нагруженного корректора осуществляется косвенным способом через напряжения U_1 и U_0 (рис. 22) и вычисляется по формуле:

$$Z_{\text{вх}} = R_0 \frac{U_1}{U_0}.$$

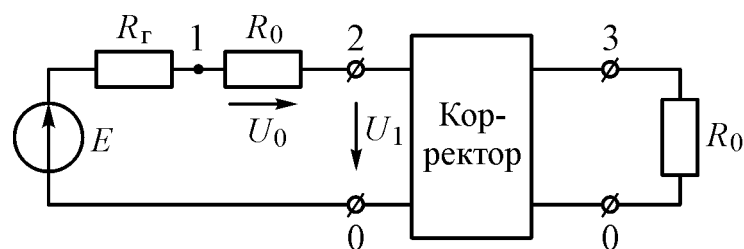


Рис. 22

– Измерение ослабления корректора производится при нагрузке его с обеих сторон на сопротивление $R_0 = 200 \text{ Ом}$.

Примечание: для измерения ослабления использовать Bode Plotter. Гнезда IN подключить к точкам 1-0, гнезда OUT к точкам 3-0. Масштаб по вертикальной оси взять логарифмическим.

– Результаты вычислений и измерений рекомендуется оформить в виде таблицы 22.

Таблица 22

	$A_{\text{КТ}}, \text{дБ}$	$A_{\text{кр}}, \text{дБ}$	$A_{\text{К изм}}, \text{дБ}$	$Z_{\text{ВХ}}, \text{Ом}$	$Z_{\text{ВХ изм}}, \text{Ом}$
$f, \text{кГц}$	Требуемое значение $A_{\text{КТ}} = A_0 - A_{\text{Ц}}$	Расчетные значения	Измеренные значения	Расчетные значения	Измеренные значения

4. Требования к отчету

Отчет должен содержать:

- 4.1. Предварительные расчеты, выполненные в соответствии с п. 2.2.
- 4.2. Схему рассчитанного корректора и значения ее элементов.
- 4.3. Результаты эксперимента, оформленные в виде табл. 22.
- 4.4. Графики входного сопротивления и ослабления корректора (расчетные и измеренные).
- 4.5. Выводы по работе.

5. Приложение

Реальные цепи, предназначенные для передачи электрических сигналов, содержат частотно-зависимые элементы, что вызывает появление линейных искажений (амплитудно-частотных и фазо-частотных).

В данной работе исследуется амплитудный корректор, предназначенный для уменьшения амплитудно-частотных искажений.

На рис. 23 изображена характеристика затухания цепи $A_{\text{ц}}(f)$, имеющая подъем на верхних частотах. Если по цепи передавать электрический сигнал,

основная энергия которого сосредоточена в диапазоне частот от 0 до f_{\max} , то составляющие сигнала, имеющие более высокие частоты, будут претерпевать большее ослабление. Вследствие этого на приемном конце цепи будет нарушено соотношение амплитуд частотных составляющих сигнала и, следовательно, будет нарушена форма сигнала. Возникает необходимость либо полностью исключить частотную зависимость ослабления цепи, либо уменьшить эту зависимость. Для этой цели используют амплитудные корректоры. Они дополняют характеристику ослабления цепи до линейно-независимой от частоты.

Амплитудный корректор включается каскадно-согласованно с цепью. Характеристика $A_k(f)$ в сумме с характеристикой цепи $A_{\text{ц}}(f)$ должны дать постоянную величину A_0 (рис. 23):

$$A_0 = A_k(f) + A_{\text{ц}}(f).$$

В лаборатории исследуется схема Т-образного амплитудного корректора, состоящего из двух реактивных элементов (рис. 24 или рис. 25).

Для данной схемы справедливо соотношение:

$$A_k = 20 \lg \left| 1 + \frac{Z_1}{R_0} \right| \text{ [дБ]} \quad (1)$$

или

$$A_k = 10 \lg \frac{\left(1 + \frac{R_1}{R_0} \right)^2 + \left(\frac{R_1}{X_1} \right)^2}{1 + \left(\frac{R_1}{X_1} \right)^2} \text{ [дБ]}, \quad (2)$$

где A_k – ослабление корректора; X_1 – сопротивление реактивного двухполюсника L_1 ($X_1 = \omega L_1$) (рис. 20) или C_1 ($X_1 = 1/(\omega C_1)$) (рис. 24).

Для схемы рис. 19 при $f = 0$ $X_1 = \infty$; $Z_1 = R_1$; $A_k = A_{k \max}$. Подставив эти значения в (1), получим:

$$A_{k \max} = 20 \lg \left| 1 + \frac{R_1}{R_0} \right| \text{ [дБ]}. \quad (3)$$

Отсюда находим R_1 :

$$R_1 = R_0 (10^{0,05 A_{k \max}} - 1). \quad (4)$$

Формулы (2) и (4) являются основными соотношениями для расчета корректора.

Рассмотрим порядок расчета амплитудного корректора.

1. По известным значениям $A_{\text{ц}}$ и A_0 находим требуемую характеристику ослабления корректора

$$A_k(f) = A_0 - A_{\text{ц}}(f). \quad (5)$$

2. Находим R_1 по формуле (4), где $A_{k \max} = A_0 - A_{ц \min}$ – затухание корректора на $f = 0$ для рис. 24 и на $f = f_{\max}$ для рис. 20; R_0 – сопротивление нагрузки корректора (для всех вариантов $R_0 = 200 \text{ Ом}$).

3. Задаемся частотой f_1 , разделяющей рабочий диапазон на два примерно одинаковых интервала ($f_1 = 25 \text{ кГц}$), и находим соответствующее значение A_k (рис. 23).

4. Находим X_1 по формуле, которую можно получить из (1):

$$X_1 = R_1 \sqrt{\frac{10^{0,1A_{k1}} - 1}{10^{0,1A_{k \max}} - 10^{0,1A_{k1}}}}.$$

5. Определяем реактивный элемент продольного плеча:

$$\text{для рис. 24} \quad X_1 = \frac{1}{\omega_1 C_1} \quad C_1 = \frac{1}{2\pi f_1 X_1};$$

$$\text{для рис. 25} \quad X_1 = \omega_1 L_1 \quad L_1 = \frac{X_1}{2\pi f_1}.$$

6. Исходя из условия обратности двухполюсников Z_1 и Z_2 , определяем значения элементов поперечного плеча корректора:

$$L_2 = C_1 R_0^2; \quad C_2 = \frac{L_1}{R_0^2}; \quad R_2 = \frac{R_0^2}{R_1}.$$

Расчетную характеристику ослабления полученного корректора $A_{кр}(f)$ вычисляют по формуле (2) и сравнивают ее с требуемой $A_{кт}(f)$ (5).

Точное совпадение $A_{кр}(f)$ и $A_{кт}(f)$ будет только на частотах $f = 0$ и $f = f_1$ для схемы (рис. 24) и $f = f_1$ и $f = f_{\max}$ для схемы (рис. 25).

6. Контрольные вопросы

- 6.1. Виды линейных искажений в цепях связи.
- 6.2. На каком принципе включается в корректируемую цепь Т-образный амплитудный корректор?
- 6.3. Уметь по заданной характеристике $A_k(f)$ построить схему корректора.
- 6.4. Какую роль играет резистор R_1 в двухполюснике Z_1 корректора?
- 6.5. Изменяет ли амплитудный корректор фазо-частотную характеристику цепи?
- 6.6. Вносит ли электрический фильтр линейные искажения в цепь связи? Если вносит, то искажения какого вида?
- 6.7. Как связаны между собой элементы продольного и поперечного 2-х полюсников корректоров?

Таблица 23

№ вар.	A_{Σ} , дБ											
	f , кГц A_0 , дБ	0	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50
1	11,0	10,9	10,0	9,0	7,5	6,2	4,8	3,3	2,4	1,5	0,8	0,1
2	15,6	0	5,1	9,3	11,6	12,9	13,7	14,2	14,5	14,7	14,9	15,0
3	11,0	10,5	8,8	5,8	4,0	2,6	2,0	1,5	1,0	0,7	0,3	0,1
4	15,7	15,6	15,1	13,8	12,3	10,8	9,5	8,4	7,0	5,0	3,0	0,1
5	10,9	0	1,9	4,6	6,6	7,8	8,6	9,2	9,6	9,8	10,0	10,2
6	15,8	15,6	13,9	10,9	8,5	6,7	5,4	4,4	3,6	2,0	0,8	0,2
7	16,0	0,4	9,7	13,3	14,6	15,1	15,4	15,6	15,7	15,8	15,9	16,0
8	12,5	12,0	10,3	7,3	5,5	4,1	3,5	3,0	2,5	2,2	1,8	1,6
9	17,0	1,4	6,5	10,7	13,0	14,3	15,1	15,6	15,9	16,1	16,3	16,4
10	10,9	0	4,6	7,8	9,2	9,8	10,2	10,4	10,5	10,6	10,7	10,8
11	12,0	11,9	11,0	10,0	8,5	7,2	5,8	4,3	3,4	2,5	1,8	1,1
12	16,5	0,9	6,0	10,2	12,5	13,8	14,6	15,1	15,4	15,7	15,8	15,9
13	13,0	12,5	10,8	7,8	6,0	4,6	4,0	3,5	3,0	2,7	2,3	2,1
14	15,6	0	9,3	12,9	14,2	14,7	15,0	15,2	15,3	15,4	15,5	15,6
15	16,0	15,9	15,4	14,1	12,6	11,1	9,8	8,7	7,7	6,1	4,3	0,4
16	11,5	0,6	2,5	5,2	7,2	8,4	9,2	9,6	10,2	10,4	10,6	10,8
17	16,8	16,6	14,9	11,9	9,5	7,7	6,4	5,4	4,6	3,2	1,8	1,2
18	11,3	0,4	5,0	8,2	9,6	10,2	10,6	10,8	10,9	11,0	11,1	11,2
19	14,0	13,9	13,0	12,0	10,5	9,2	7,8	6,3	5,4	4,5	3,8	3,1
20	16,0	0,4	5,5	9,7	12,0	13,3	14,1	14,6	14,9	15,1	15,3	15,4
21	14,5	14,0	12,3	9,3	7,5	6,1	5,5	5,0	4,5	4,2	3,8	3,6
22	12,0	1,1	5,7	8,9	10,3	10,9	11,3	11,5	11,6	11,7	11,8	11,9
23	18,0	17,9	17,4	16,1	14,6	13,1	11,8	10,7	9,7	8,1	6,3	2,4
24	13,0	2,1	4,0	6,7	8,7	9,9	10,7	11,1	11,7	11,9	12,1	12,3

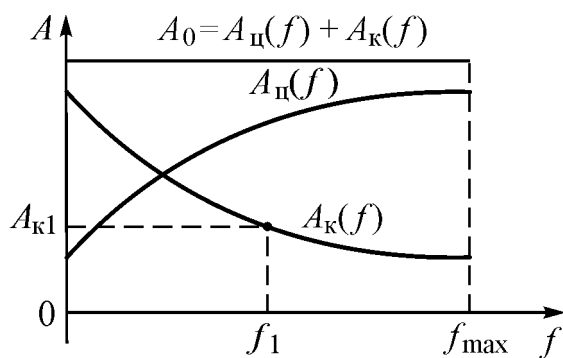


Рис. 23

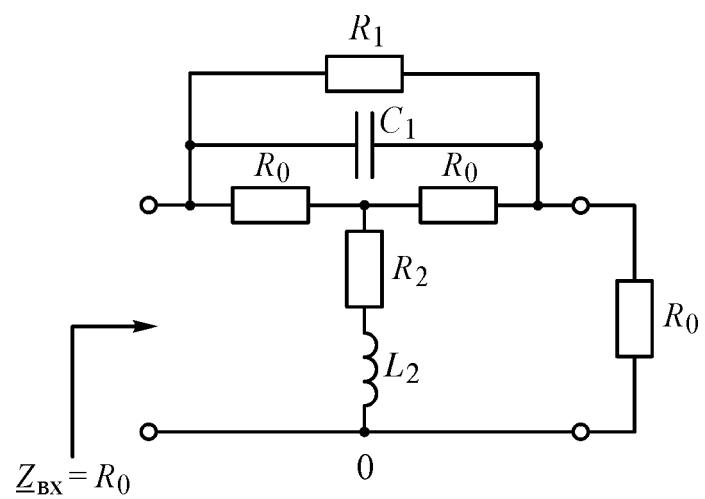


Рис. 24

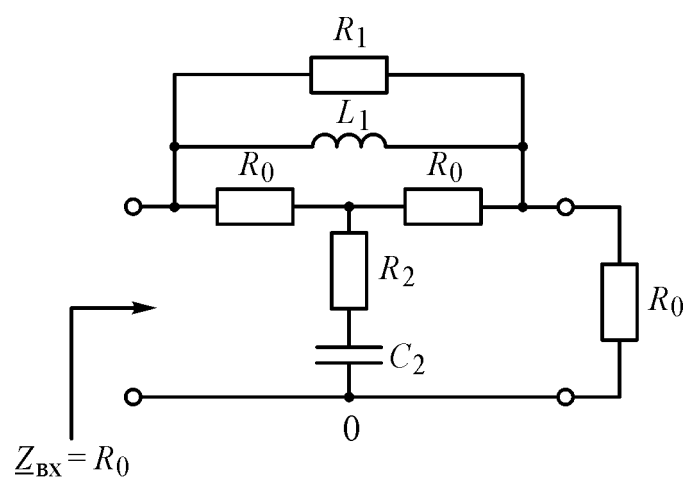


Рис. 25

Литература

1. Бакалов В.П., Дмитриков В.Ф., Крук Б.И. Основы теории цепей. Учебник – М.: Радио и связь, 2000 – 589 с.
2. Бакалов В.П., Воробийченко П.П., Крук Б.И. Теория электрических цепей. – М.: Радио и связь, 1998. – 494 с.
3. Бакалов В.П., Игнатов А.Н., Крук Б.И. Основы теории электрических цепей и электроники. – М.: Радио и связь, 1989. – 528 с.
4. Шебес М.Р., Каблукова Н.В. Задачник по теории электрических цепей: учебное пособие для вузов. – М.: Высшая школа, 1990. – 544 с.
5. Воробийченко П.П. Теория электрических цепей. Сборник задач и упражнений. – М.: Радио и связь, 1989. – 328 с.

Оглавление

	Стр.
Общие указания к выполнению лабораторных работ	3
Лабораторная работа № 11. Исследование реактивных двухполюсников	4
Лабораторная работа № 12. Исследование четырехполюсников	8
Лабораторная работа № 13. Цепи с операционными усилителями	13
Лабораторная работа № 14. Нелинейные цепи постоянного тока	17
Лабораторная работа № 15. Нелинейные цепи в режиме гармонических колебаний	20
Лабораторная работа № 16. RC-автогенератор с мостом Вина в цепи обратной связи	24
Лабораторная работа № 17. Исследование активных RC-фильтров	28
Лабораторная работа № 18. Исследование амплитудного корректора	36

**Валерий Пантелеевич Бакалов
Ираида Николаевна Козляева
Майя Ивановна Сметанина
Наталья Юрьевна Косулина
Наталья Михайловна Гусельникова**

ОСНОВЫ ТЕОРИИ ЦЕПЕЙ
Часть 2

Методические указания
к компьютерным лабораторным работам

Редактор: О.Б. Журавлева
Корректор: Д.С. Шкитина

Подписано в печать
формат бумаги 62х84 1/16, отпечатано на ризографе, шрифт № 10,
изд. л. , заказ № , тираж – , типография СибГУТИ
630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86