

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
Учреждение образования
«Витебский государственный технологический университет»

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ. НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ

**Методические указания
по выполнению лабораторных работ для студентов
специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и
производств»**

ВИТЕБСК
2026

УДК 621.3

Составители:

В. Ф. Куксевич, Ю. В. Новиков

Одобрено кафедрой «Автоматизации производственных процессов»
УО «ВГТУ», протокол № 6 от 22.01.2026.

Рекомендовано к изданию редакционно-издательским советом
УО «ВГТУ», протокол № 6 от 27.02.2026.

Теоретические основы электротехники. Электрические фильтры. Несинусоидальные токи : методические указания по выполнению лабораторных работ / сост. В. Ф. Куксевич, Ю. В. Новиков. – Витебск : УО «ВГТУ», 2026. – 42 с.

Методические указания являются руководством по выполнению лабораторных работ разделов «Электрические фильтры» и «Несинусоидальные токи» дисциплины «Теоретические основы электротехники» для студентов специальности 6-05-0713-04 «Автоматизация технологических процессов и производств» и содержат общие требования, предъявляемые к выполнению лабораторных работ, теоретические вопросы подготовки к ним; приводят подробное описание порядка выполнения лабораторных работ, получения характеристик исследуемых электрических цепей.

УДК 621.3

© УО «ВГТУ», 2026

Содержание

Общие требования к выполнению лабораторных работ	4
Лабораторная работа 1	
<i>Исследование фильтров нижних частот (ФНЧ)</i>	5
Лабораторная работа 2	
<i>Исследование фильтров верхних частот (ФВЧ)</i>	10
Лабораторная работа 3	
<i>Исследование полосового LC-фильтра</i>	15
Лабораторная работа 4	
<i>Исследование полосового RC-фильтра и моста Вина – Робинсона</i>	20
Лабораторная работа 5	
<i>Исследование заграждающего LC-фильтра</i>	25
Лабораторная работа 6	
<i>Исследование двойного T-образного моста</i>	29
Лабораторная работа 7	
<i>Анализ цепи несинусоидального тока</i>	32
Литература	41

Общие требования к выполнению лабораторных работ

Перед выполнением лабораторной работы обучающийся должен изучить описание предстоящей работы, соответствующий ей теоретический материал.

Отчет по выполненной лабораторной работе составляется каждым обучающимся индивидуально. При оформлении отчета обязательно соблюдение ГОСТа на буквенные и графические обозначения физических величин и элементов схем.

Графики изображаются в прямоугольной системе координат с указанием масштабов по осям координат.

Расчетные формулы приводятся сначала в общем виде, затем с подставленными числовыми значениями и ответом с указанием единиц измерения рассчитанной величины.

Если преподавателем будет предложено переделать какую-либо часть отчета, то в этом случае исправления вносятся в текст отчета при помощи корректирующих материалов. Листы с большим числом исправлений следует переделать полностью.

Лабораторная работа 1

Исследование фильтров нижних частот

Цель работы: изучение принципа работы Т- и П-образной схем фильтров нижних частот, экспериментальное получение их амплитудно-частотных характеристик.

Теоретические сведения

Частотные электрические фильтры – устройства, выделяющие из электрических сигналов, занимающих широкую полосу частот, сигналы с заданными частотами.

Часть полосы частот, в которой ослабление сигнала фильтром минимально, называется полосой пропускания (ПП). Часть полосы частот, в которой ослабление сигнала фильтром максимально, называется полосой затухания (ПЗ). В идеальных частотных электрических фильтрах в пределах ПП отсутствует ослабление сигнала ($U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$), а вне ПП отсутствует выходной сигнал ($U_{\text{вых}} = 0$). Частота f_c , разделяющая ПП и ПЗ, называется частотой среза.

Основной параметр частотного электрического фильтра – коэффициент передачи:

$$A = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}}. \quad (1.1)$$

Основная характеристика частотного электрического фильтра – амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) $A(f)$ – зависимость коэффициента передачи A от частоты сигнала f . В зависимости от вида АЧХ различают: фильтры нижних частот (ФНЧ), фильтры верхних частот (ФВЧ), полосовые фильтры (ПФ), заграждающие фильтры (ЗФ).

ФНЧ – частотный электрический фильтр, пропускающий электрические сигналы низкой частоты и задерживающий электрические сигналы высокой частоты. АЧХ идеального ФНЧ имеет вид:

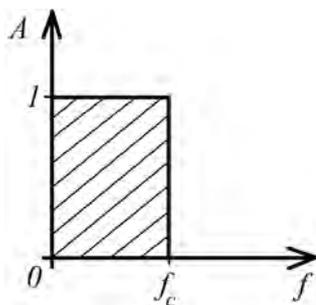


Рисунок 1.1 – АЧХ идеального ФНЧ

Частота среза ФНЧ:

$$f_c = \frac{1}{\pi\sqrt{LC}}. \quad (1.2)$$

Различают Т-образную (рис. 1.2) и П-образную (рис. 1.3) схемы ФНЧ.

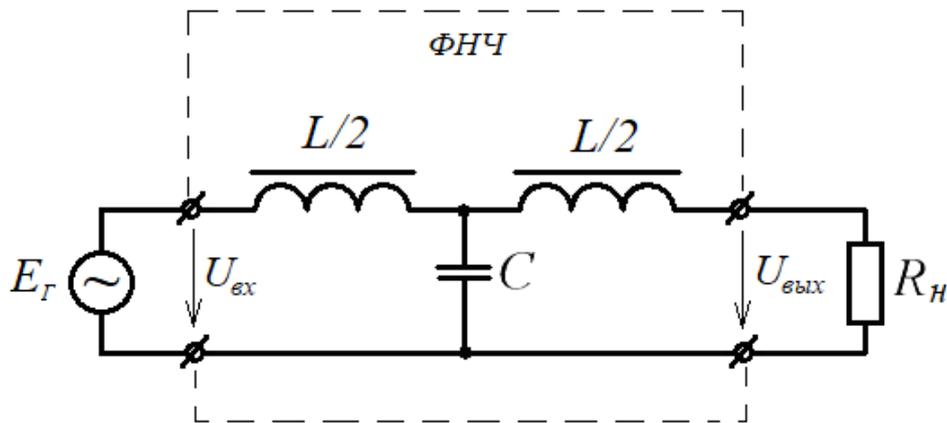


Рисунок 1.2 – Т-образная схема ФНЧ

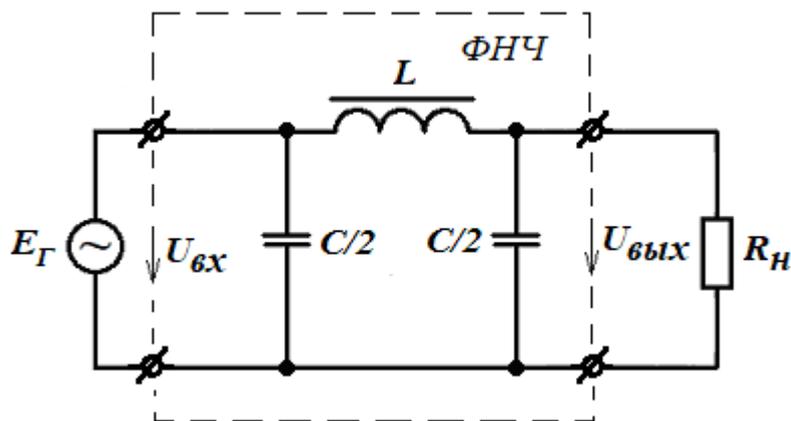


Рисунок 1.3 – П-образная схема ФНЧ

Принцип действия обеих схем основан на зависимости реактивного сопротивления индуктивных и емкостных элементов от частоты электрических сигналов.

При подаче на вход ФНЧ сигнала низкой частоты ($f \rightarrow 0$) реактивное индуктивное сопротивление катушек $X_L = 2\pi fL \rightarrow 0$, реактивное емкостное сопротивление конденсаторов $X_C = \frac{1}{2\pi fC} \rightarrow \infty$, и сигнал проходит через катушки индуктивности в нагрузку R_n . При этом $U_{вых} \approx U_{вх}$.

При подаче на вход ФНЧ сигнала высокой частоты ($f \rightarrow \infty$) реактивное индуктивное сопротивление катушек $X_L = 2\pi fL \rightarrow \infty$, реактивное емкостное сопротивление конденсаторов $X_C = \frac{1}{2\pi fC} \rightarrow 0$, и сигнал, ослабленный большим реактивным сопротивлением катушек индуктивности, возвратится через конденсаторы в генератор E_G . При этом $U_{вых} \approx 0$.

При подключении к ФНЧ нагрузки с сопротивлением, равным характеристическому сопротивлению фильтра, ФНЧ работает в согласованном режиме с передачей в нагрузку максимальной мощности. Характеристическое сопротивление ФНЧ:

$$K = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (1.3)$$

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе Т-образную схему ФНЧ, представленную на рисунке 1.4.

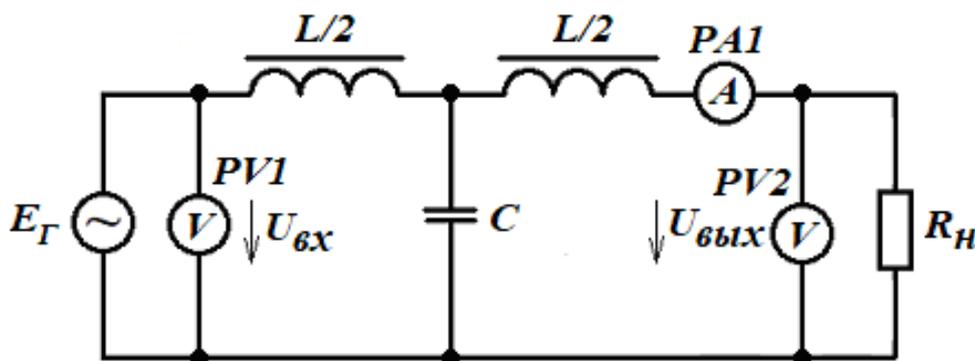


Рисунок 1.4 – Т-образная схема ФНЧ

2. Используя значения частоты среза f_c и индуктивности L из таблицы 1.1 для Т-образной схемы ФНЧ, определить из (1.2) значение емкости C , а из (1.3) значение характеристического сопротивления K . Занести значения C и K в таблицу 1.1.

3. Собрать Т-образную схему ФНЧ с учетом данных таблицы 1.1. В качестве источника E_G использовать блок переменного напряжения стенда УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Катушки индуктивности выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах) или установить из блока переменной индуктивности стенда. Конденсатор установить из блока переменной емкости стенда. Резистор нагрузки установить из блока переменного сопротивления

станда, его сопротивление R_H установить равным характеристическому сопротивлению K из таблицы 1.1.

Таблица 1.1 – Параметры элементов схемы

Тип схемы ФНЧ	Параметры элементов схемы			
	f_c , кГц	L , мГн	C , мкФ	K , Ом
Т-образная	4	30		
П-образная	4		0,5	

4. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы станда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра PVI , подать однофазное переменное напряжение $10 В$ (при указанном в п. 3 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять $0,5 кГц$). Показания измерительных приборов схемы $U_{вых}$ и I для $f = 0,5 кГц$ занести в таблицу 1.2.

Таблица 1.2 – Экспериментальные и расчетные данные

f , кГц	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{вх}$, В	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{вых}$, В									
I , мА									
A									

5. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом $1 кГц$ и поддерживая постоянным значение $U_{вх} = 10 В$, измерить значения $U_{вых}$ и I , и занести их в таблицу 1.2.

6. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы станда, разобрать Т-образную схему ФНЧ.

7. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи Т-образной схемы ФНЧ и занести их в таблицу 1.2.

8. Изобразить в отчете по лабораторной работе П-образную схему ФНЧ, представленную на рисунке 1.5.

9. Используя значения частоты среза f_c и емкости C из таблицы 1.1 для П-образной схемы ФНЧ, определить из (1.2) значение индуктивности L , а из (1.3) значение характеристического сопротивления K . Занести значения L и K в таблицу 1.1.

10. Собрать П-образную схему ФНЧ с учетом данных таблицы 1.1. В качестве источника $E_{Г}$ использовать блок переменного напряжения стенда УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Катушку индуктивности установить из блока переменной индуктивности стенда. Конденсаторы выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах) или установить из блока переменной емкости стенда. Резистор нагрузки установить из блока переменного сопротивления стенда. Его сопротивление $R_{н}$ установить равным характеристическому сопротивлению K из таблицы 1.1.

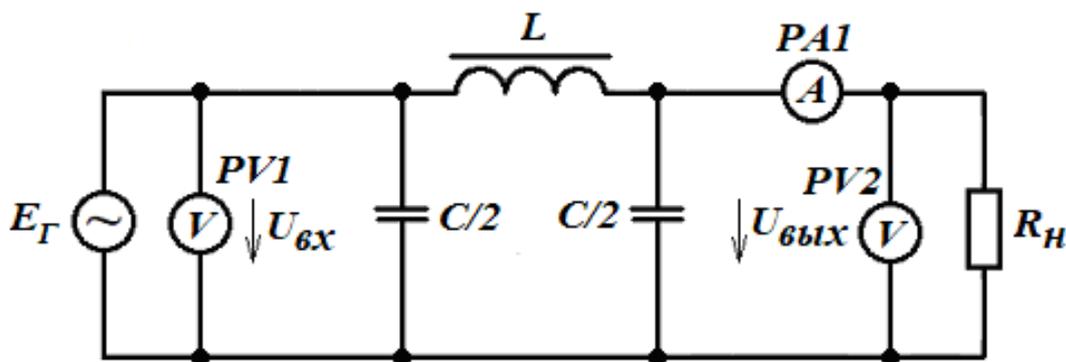


Рисунок 1.5 – П-образная схема ФНЧ

11. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра $PV1$, подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 10 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять $0,5\text{ кГц}$). Показания измерительных приборов схемы $U_{вых}$ и I для $f = 0,5\text{ кГц}$ занести в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Экспериментальные и расчетные данные

$f, \text{кГц}$	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{вх}, \text{В}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{вых}, \text{В}$									
$I, \text{мА}$									
A									

12. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом 1 кГц и поддерживая постоянным значение $U_{вх} = 10\text{ В}$, измерить значения $U_{вых}$ и I , и занести их в таблицу 1.3.

13. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать П-образную схему ФНЧ.

14. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи Т-образной схемы ФНЧ и занести их в таблицу 1.3.

15. По данным таблицы 1.2 построить АЧХ $A(f)$ Т-образной схемы ФНЧ, по данным таблицы 1.3 построить АЧХ $A(f)$ П-образной схемы ФНЧ.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Т-образная схема ФНЧ (рис. 1.4).
3. Таблица 1.1 с параметрами элементов схем.
4. Таблица 1.2 с экспериментальными и расчетными данными Т-образной схемы ФНЧ.
5. П-образная схема ФНЧ (рис. 1.5).
6. Таблица 1.3 с экспериментальными и расчетными данными П-образной схемы ФНЧ.
7. АЧХ $A(f)$ Т-образной схемы ФНЧ по данным таблицы 1.2.
8. АЧХ $A(f)$ П-образной схемы ФНЧ по данным таблицы 1.3.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение частотного электрического фильтра, коэффициента передачи и АЧХ частотного электрического фильтра.
2. Изобразить и пояснить построение АЧХ ФНЧ.
3. Сформулировать определение ФНЧ и пояснить принцип действия Т-образной схемы ФНЧ.
4. Сформулировать определение ФНЧ и пояснить принцип действия П-образной схемы ФНЧ.

Лабораторная работа 2

Исследование фильтров верхних частот (ФВЧ)

Цель работы: изучение принципа работы Т- и П-образной схем ФВЧ, экспериментальное получение их АЧХ.

Теоретические сведения

ФВЧ – частотный электрический фильтр, пропускающий электрические сигналы высокой частоты и задерживающий электрические сигналы низкой частоты. АЧХ идеального ФВЧ имеет вид:

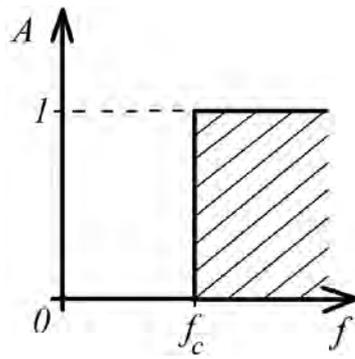


Рисунок 2.1 – АЧХ идеального ФВЧ

Частота среза ФВЧ:

$$f_c = \frac{1}{4\pi\sqrt{LC}}. \quad (2.1)$$

Различают Т-образную (рис. 2.2) и П-образную (рис. 2.3) схемы ФВЧ.

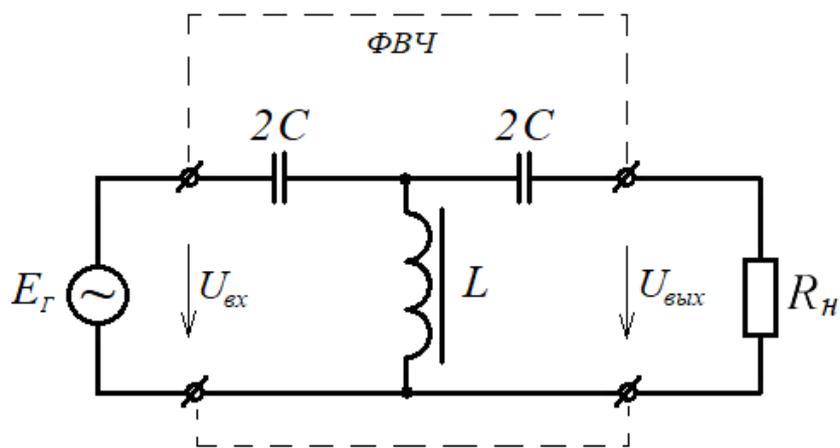


Рисунок 2.2 – Т-образная схема ФВЧ

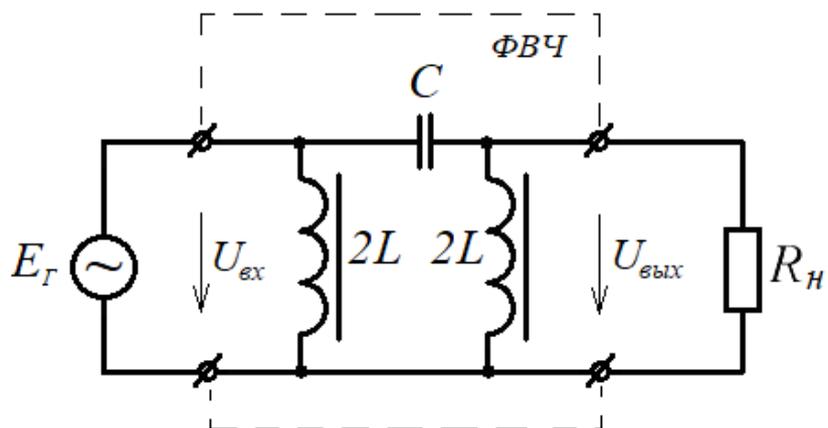


Рисунок 2.3 – П-образная схема ФВЧ

Принцип действия обеих схем основан на зависимости реактивного сопротивления индуктивных и емкостных элементов от частоты электрических сигналов.

При подаче на вход ФВЧ сигнала низкой частоты ($f \rightarrow 0$) реактивное индуктивное сопротивление катушек $X_L = 2\pi fL \rightarrow 0$, реактивное емкостное сопротивление конденсаторов $X_C = \frac{1}{2\pi fC} \rightarrow \infty$ и сигнал, ослабленный большим реактивным сопротивлением конденсаторов X_C , возвратится через катушки индуктивности в генератор E_G . При этом $U_{вых} \approx 0$.

При подаче на вход ФВЧ сигнала высокой частоты ($f \rightarrow \infty$) реактивное индуктивное сопротивление катушек $X_L = 2\pi fL \rightarrow \infty$, реактивное емкостное сопротивление конденсаторов $X_C = \frac{1}{2\pi fC} \rightarrow 0$ и сигнал проходит через конденсаторы в нагрузку R_H . При этом $U_{вых} \approx U_{вх}$.

При подключении к ФВЧ нагрузки с сопротивлением, равным характеристическому сопротивлению фильтра, ФВЧ работает в согласованном режиме с передачей в нагрузку максимальной мощности. Характеристическое сопротивление ФВЧ рассчитывается по (1.3).

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе Т-образную схему ФВЧ, представленную на рисунке 2.4.

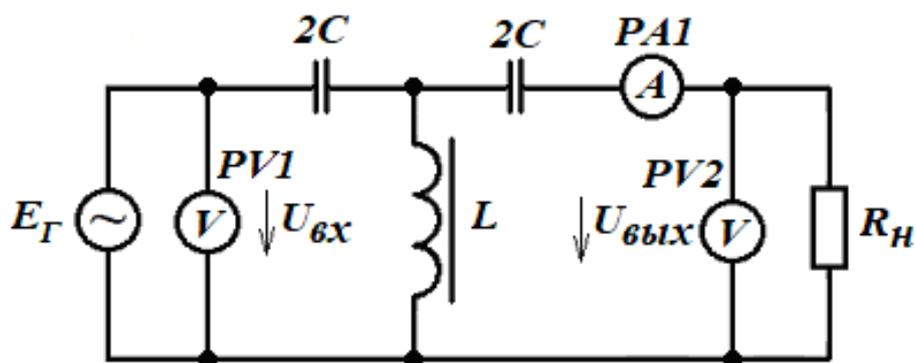


Рисунок 2.4 – Т-образная схема ФВЧ

2. Используя значения частоты среза f_c и емкости C из таблицы 2.1 для Т-образной схемы ФВЧ, определить из (2.1) значение индуктивности L , а из (1.3) значение характеристического сопротивления K . Занести значения L и K в таблицу 2.1.

3. Собрать Т-образную схему ФВЧ с учетом данных таблицы 2.1. В качестве источника E_G использовать блок переменного напряжения стенда

УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Катушку индуктивности установить из блока переменной индуктивности стенда. Конденсаторы выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах) или установить из блока переменной емкости стенда. Резистор нагрузки установить из блока переменного сопротивления стенда, его сопротивление R_n установить равным характеристическому сопротивлению K из таблицы 2.1.

Таблица 2.1 – Параметры элементов схемы

Тип схемы ФВЧ	Параметры элементов схемы			
	$f_c, \text{кГц}$	$L, \text{мГн}$	$C, \text{мкФ}$	$K, \text{Ом}$
Т-образная	4		0,25	
П-образная	4	5		

4. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра PVI , подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 3 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять $0,5 \text{ кГц}$). Показания измерительных приборов схемы $U_{\text{вых}}$ и I для $f = 0,5 \text{ кГц}$ занести в таблицу 2.2.

Таблица 2.2 – Экспериментальные и расчетные данные

$f, \text{кГц}$	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{\text{вх}}, \text{В}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{\text{вых}}, \text{В}$									
$I, \text{мА}$									
A									

5. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом 1 кГц и поддерживая постоянным значение $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$, измерить значения $U_{\text{вых}}$ и I , и занести их в таблицу 2.2.

6. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать Т-образную схему ФВЧ.

7. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи Т-образной схемы ФВЧ и занести их в таблицу 2.2.

8. Изобразить в отчете по лабораторной работе П-образную схему ФВЧ, представленную на рисунке 2.5.

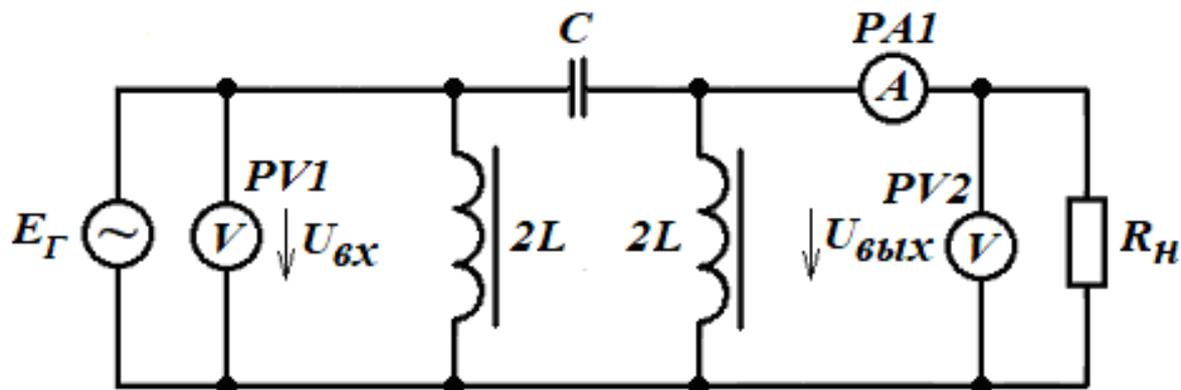


Рисунок 2.5 – П-образная схема ФВЧ

9. Используя значения частоты среза f_c и индуктивности L из таблицы 2.1 для П-образной схемы ФВЧ, определить из (2.1) значение емкости C , а из (1.3) значение характеристического сопротивления K . Занести значения C и K в таблицу 2.1.

10. Собрать П-образную схему ФВЧ с учетом данных таблицы 2.1. В качестве источника E_G использовать блок переменного напряжения стенда УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Катушки индуктивности выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах) или установить из блока переменной индуктивности стенда. Конденсатор установить из блока переменной емкости стенда. Резистор нагрузки установить из блока переменного сопротивления стенда. Его сопротивление R_H установить равным характеристическому сопротивлению K из таблицы 2.1.

11. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра $PV1$, подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 10 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять $0,5\text{ кГц}$). Показания измерительных приборов схемы $U_{\text{вых}}$ и I для $f = 0,5\text{ кГц}$ занести в таблицу 2.3.

12. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом 1 кГц и поддерживая постоянным значение $U_{\text{вх}} = 10\text{ В}$, измерить значения $U_{\text{вых}}$ и I , и занести их в таблицу 2.3.

13. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать П-образную схему ФВЧ.

14. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи П-образной схемы ФВЧ и занести их в таблицу 2.3.

Таблица 2.3 – Экспериментальные и расчетные данные

$f, \text{кГц}$	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{\text{вх}}, \text{В}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{\text{вых}}, \text{В}$									
$I, \text{мА}$									
A									

14. По данным таблицы 2.2 построить АЧХ $A(f)$ Т-образной схемы ФВЧ, по данным таблицы 2.3 построить АЧХ $A(f)$ П-образной схемы ФВЧ.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Т-образная схема ФВЧ (рис. 2.4).
3. Таблица 2.1 с параметрами элементов схем.
4. Таблица 2.2 с экспериментальными и расчетными данными Т-образной схемы ФВЧ.
5. П-образная схема ФВЧ (рис. 2.5).
6. Таблица 2.3 с экспериментальными и расчетными данными П-образной схемы ФВЧ.
7. АЧХ $A(f)$ Т-образной схемы ФВЧ по данным таблицы 2.2.
8. АЧХ $A(f)$ П-образной схемы ФВЧ по данным таблицы 2.3.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение частотного электрического фильтра, коэффициента передачи и АЧХ частотного электрического фильтра.
2. Изобразить и пояснить построение АЧХ ФВЧ.
3. Сформулировать определение ФВЧ и пояснить принцип действия Т-образной схемы ФВЧ.
4. Сформулировать определение ФВЧ и пояснить принцип действия П-образной схемы ФВЧ.

Лабораторная работа 3

Исследование полосового LC-фильтра

Цель работы: изучение принципа работы схемы полосового LC-фильтра, экспериментальное получение его АЧХ.

Теоретические сведения

Полосовой фильтр (ПФ) – частотный электрический фильтр, пропускающий электрические сигналы в полосе частот вблизи квазирезонансной частоты. АЧХ идеального ПФ имеет вид:

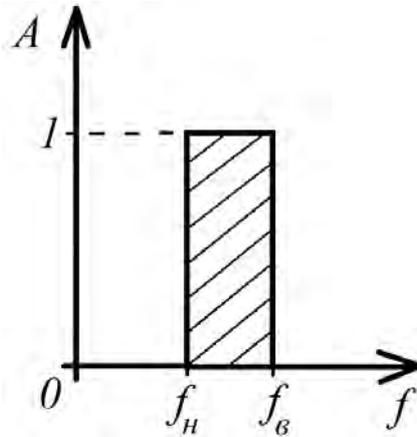


Рисунок 3.1 – АЧХ идеального ПФ

Схема полосового LC-фильтра представляет собой комбинацию схем ФВЧ и ФНЧ. При этом продольное сопротивление такого частотного электрического фильтра состоит из последовательно соединенных катушки индуктивности и конденсатора, а поперечное сопротивление представляет собой параллельное соединение таких же элементов (рис. 3.2).

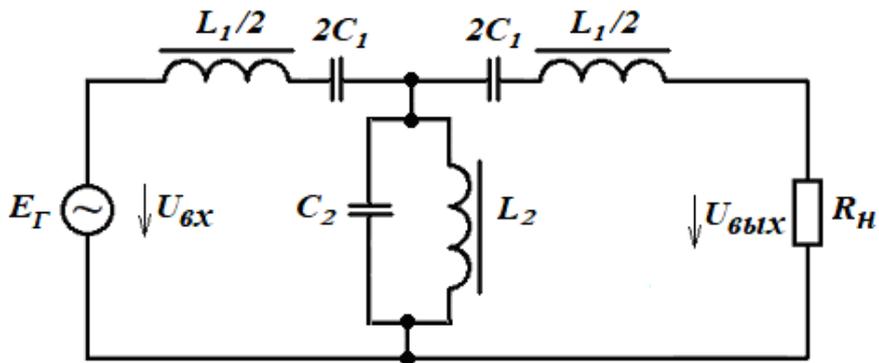


Рисунок 3.2 – Схема полосового LC-фильтра

Параметры последовательных и параллельных контуров подбираются такими, чтобы они были настроены на одну и ту же частоту, называемую квазирезонансной частотой:

$$f_0 = \sqrt{f_в \cdot f_н}, \quad (3.1)$$

где f_n и $f_в$ – соответственно нижняя и верхняя граничные частоты полосы пропускания полосового LC-фильтра.

На квазирезонансной частоте сопротивление последовательного контура стремится к нулю, сопротивление параллельного контура бесконечно велико. Поэтому сигналы частот, близких к квазирезонансной частоте, будут пропускаться контуром. При отклонении частоты сигнала от квазирезонансной частоты в сторону низких или высоких частот, сопротивление последовательного контура будет возрастать, а сопротивление параллельного контура уменьшаться, что приведет к ослаблению сигнала, поступающего в нагрузку.

Полоса пропускания полосового LC-фильтра рассчитывается по формуле:

$$\Delta f = f_в - f_n. \quad (3.2)$$

Параметры элементов полосового LC-фильтра, с учетом заданных значений сопротивления нагрузки и граничных частот полосы пропускания, могут быть определены по формулам:

$$\begin{aligned} C_1 &= \frac{f_в - f_n}{4\pi f_n f_в R_n}; & L_1 &= \frac{R_n}{\pi(f_в - f_n)}; \\ C_2 &= \frac{1}{\pi R_n (f_в - f_n)}; & L_2 &= \frac{R_n (f_в - f_n)}{4\pi f_n f_в}. \end{aligned} \quad (3.3)$$

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему полосового LC-фильтра, представленную на рисунке 3.3.

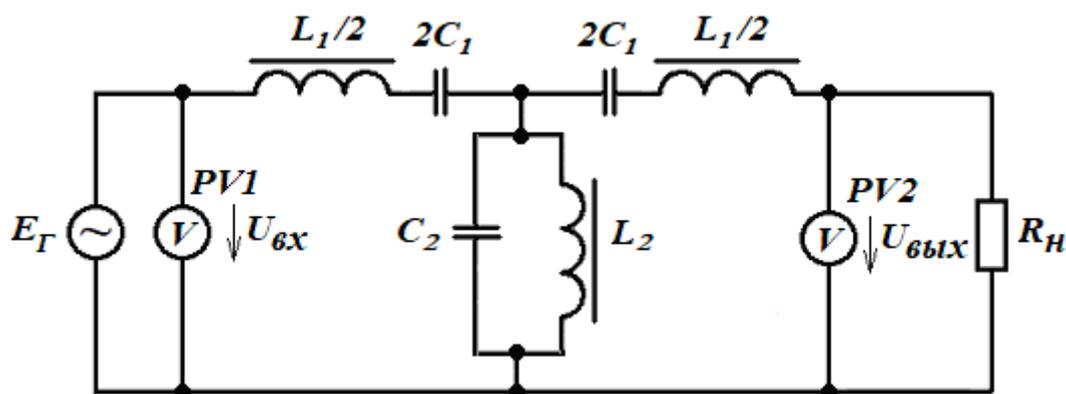


Рисунок 3.3 – Схема полосового LC-фильтра

2. Используя значения сопротивления нагрузки R_n и граничных частот полосы пропускания f_n и $f_в$ полосового LC-фильтра из таблицы 3.1, определить:

расчетные значения квазирезонансной частоты f_0 по (3.1) и полосы пропускания Δf по (3.2), значения индуктивностей и емкостей элементов схемы по (3.3). Занести рассчитанные значения в таблицу 3.1.

Таблица 3.1 – Параметры схемы

	R_n Ом	f_n кГц	f_ω кГц	f_0 кГц	Δf кГц	L_1 мГн	C_1 мкФ	L_2 мГн	C_2 мкФ
Расчетные значения	100	2	5						
Экспериментальные значения									

3. Собрать схему полосового LC-фильтра с учетом данных таблицы 3.1. В качестве источника E_T использовать блок переменного напряжения стенда УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Катушки индуктивности, конденсаторы и резистор нагрузки выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах), имеющих ближайшие номинальные значения, или установить из блоков переменной индуктивности, переменной емкости и переменного сопротивления стенда. Занести экспериментальные значения параметров R_n , L_1 , L_2 , C_1 , C_2 выбранных элементов схемы в таблицу 3.1.

4. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра $PV1$, подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 3 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять $0,5\text{ кГц}$). Показание $U_{\text{вых}}$ вольтметра $PV2$ схемы для $f = 0,5\text{ кГц}$ занести в таблицу 3.2.

Таблица 3.2 – Экспериментальные и расчетные данные

f , кГц	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{\text{вх}}$, В	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{\text{вых}}$, В									
A									

5. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом 1 кГц и поддерживая постоянным значение $U_{\text{вх}} = 10\text{ В}$, измерить значения $U_{\text{вых}}$ и занести их в таблицу 3.2.

6. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать схему полосового LC-фильтра.

7. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи полосового LC-фильтра и занести их в таблицу 3.2.

8. По данным таблицы 3.2 построить АЧХ $A(f)$ полосового LC-фильтра.

9. По графику АЧХ, в соответствии с рисунком 3.4, на уровне $0,7A_{max}$ определить значения нижней f_n и верхней f_e граничных частот и занести их в таблицу 3.1.

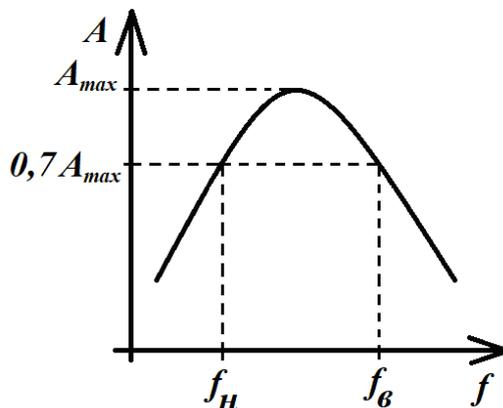


Рисунок 3.4 – Определение полосы пропускания

10. Рассчитать экспериментальные значения полосы пропускания Δf по (3.2), квазирезонансной частоты f_0 по (3.1) полосового LC-фильтра и занести их в таблицу 3.1.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема полосового LC-фильтра (рис. 3.3).
3. Расчет значений квазирезонансной частоты f_0 по (3.1), полосы пропускания Δf по (3.2), индуктивностей и емкостей элементов схемы полосового LC-фильтра по (3.3).
4. Таблица 3.1 с параметрами схемы.
5. Таблица 3.2 с экспериментальными и расчетными данными схемы полосового LC-фильтра.
6. АЧХ $A(f)$ полосового LC-фильтра по данным таблицы 3.2 с построениями на ней в соответствии с рисунком 3.4.
7. Расчет экспериментальных значений полосы пропускания Δf по (3.2) и квазирезонансной частоты f_0 по (3.1) полосового LC-фильтра.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение частотного электрического фильтра, коэффициента передачи и АЧХ частотного электрического фильтра.
2. Изобразить и пояснить построение АЧХ ПФ.
3. Сформулировать определение ПФ и пояснить принцип действия схемы полосового LC-фильтра.

4. Сформулировать определение и пояснить расчет полосы пропускания полосового LC-фильтра.

Лабораторная работа 4

Исследование полосового RC-фильтра и моста Вина – Робинсона

Цель работы: изучение принципа работы схем полосового RC-фильтра и моста Вина – Робинсона, экспериментальное получение их АЧХ.

Теоретические сведения

Полосовой фильтр (ПФ) – частотный электрический фильтр, пропускающий электрические сигналы в полосе частот вблизи квазирезонансной частоты. АЧХ идеального ПФ изображена на рисунке 3.1.

Схема полосового RC-фильтра представляет собой видоизмененную комбинацию схем ФВЧ и ФНЧ. При этом продольное сопротивление такого ЧЭФ состоит из последовательно соединенных резистора и конденсатора, а поперечное сопротивление представляет собой параллельное соединение этих же элементов (рис. 4.1).

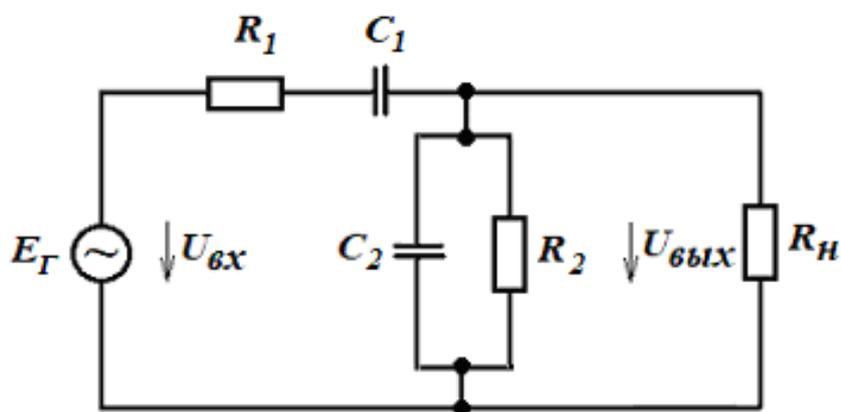


Рисунок 4.1 – Схема полосового RC-фильтра

Параметры последовательных и параллельных контуров подбираются такими, чтобы они были настроены на одну и ту же частоту, называемую квазирезонансной частотой. Сигналы частот, близких к квазирезонансной частоте, будут пропускаться фильтром в нагрузку. При условии равенства $R_1 = R_2 = R$ и $C_1 = C_2 = C$ квазирезонансная частота определяется:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}. \quad (4.1)$$

При подаче на вход схемы сигнала с частотой, ниже квазирезонансной, емкостное сопротивление конденсаторов будет увеличиваться, и сигнал, ослабленный сопротивлением конденсатора C_1 и резистора R_1 , не сможет пройти в нагрузку. При подаче на вход схемы сигнала с частотой, выше квазирезонансной, емкостное сопротивление конденсаторов уменьшается, и сигнал возвратится через оба конденсатора в генератор E_G , поэтому в нагрузке он будет отсутствовать.

Если схему полосового RC-фильтра дополнить резистивным делителем, то получится мост Вина – Робинсона (рис. 4.2).

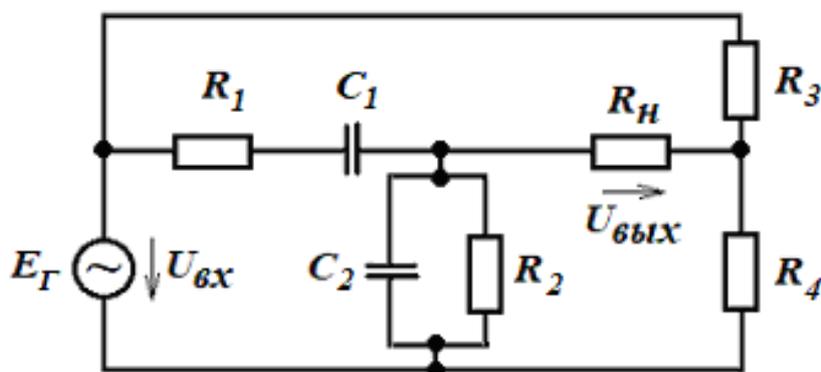


Рисунок 4.2 – Схема моста Вина – Робинсона

Резистивный делитель напряжения обеспечивает частотно-независимый коэффициент деления входного напряжения схемы, а RC-фильтр – коэффициент деления входного напряжения схемы, зависящий от частоты. При этом на квазирезонансной частоте выходное напряжение схемы будет стремиться к нулю, т. е. в отличие от полосового RC-фильтра коэффициент передачи моста Вина – Робинсона на квазирезонансной частоте имеет минимум. Таким образом, мост Вина – Робинсона может быть использован как заграждающий фильтр для подавления сигналов в определенном частотном диапазоне.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему полосового RC-фильтра, представленную на рисунке 4.3.

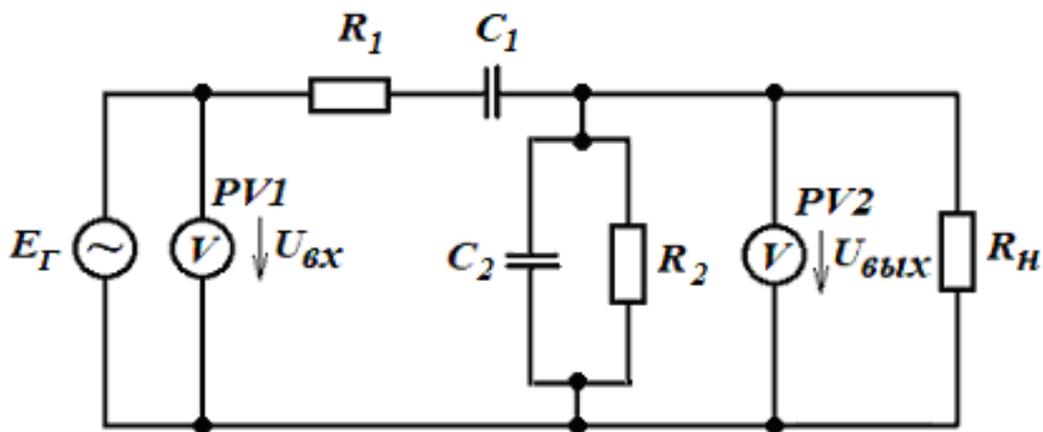


Рисунок 4.3 – Схема полосового RC-фильтра

2. Используя значения сопротивления $R = R_1 = R_2$ и емкости $C = C_1 = C_2$ из таблицы 4.1, определить значение квазирезонансной частоты f_0 полосового RC-фильтра и моста Вина – Робинсона по (4.1) и занести его в таблицу 4.1.

Таблица 4.1 – Параметры схем

$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$R_4,$ Ом	$C_1,$ мкФ	$C_2,$ мкФ	$R_n,$ Ом	$f_0,$ кГц
200	200	1000	510	0,5	0,5		

3. Собрать схему полосового RC-фильтра с учетом данных таблицы 4.1. В качестве источника E_G использовать блок переменного напряжения стенда УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Резисторы и конденсаторы полосового RC-фильтра выбрать из элементов наборного поля стенда (в пластмассовых корпусах), имеющих ближайшие номинальные значения. Резистор нагрузки R_n выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах) сопротивлением не меньше 750 Ом или установить из блока переменного сопротивления стенда. Значение R_n занести в таблицу 4.1.

4. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра $PV1$, подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 3 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять 0,5 кГц). Показание $U_{вых}$ вольтметра $PV2$ схемы для $f = 0,5$ кГц занести в таблицу 4.2.

Таблица 4.2 – Экспериментальные и расчетные данные

$f, \text{кГц}$	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{\text{вх}} \text{ В}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{\text{вых}} \text{ В}$									
A									

5. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом 1 кГц и поддерживая постоянным значение $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$, измерить значения $U_{\text{вых}}$ и занести их в таблицу 4.2.

6. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать схему полосового RC-фильтра.

7. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи полосового RC-фильтра и занести их в таблицу 4.2.

8. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему моста Вина – Робинсона, представленную на рисунке 4.4.

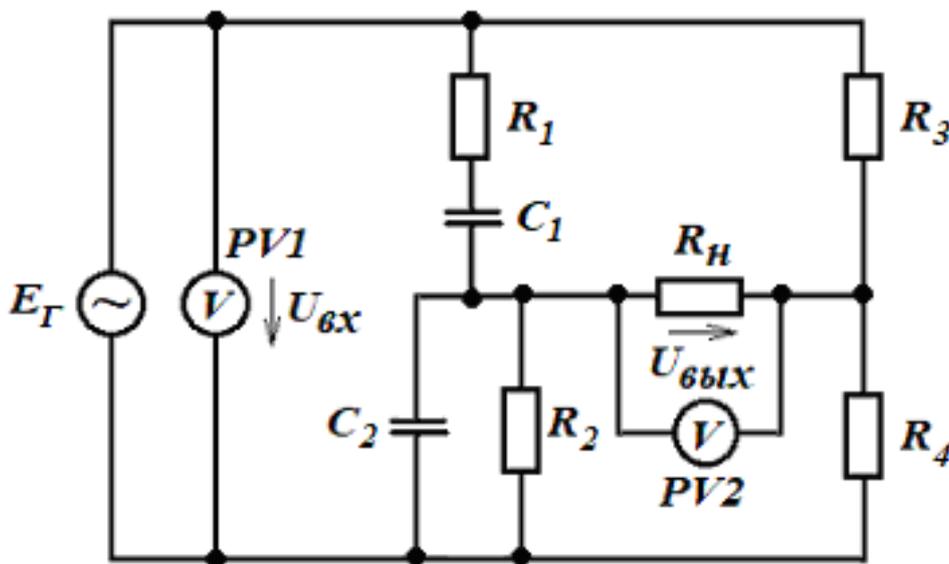


Рисунок 4.4 – Схема моста Вина – Робинсона

9. Собрать схему моста Вина – Робинсона с учетом данных таблицы 4.1. В качестве источника E_{Γ} использовать блок переменного напряжения стенда УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Резисторы и конденсаторы моста Вина – Робинсона выбрать из элементов наборного поля стенда (в пластмассовых корпусах), имеющих ближайšie номинальные значения. Резистор нагрузки $R_{\text{н}}$ оставить тем же, что и в схеме полосового RC-фильтра.

10. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра $PV1$, подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 9 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять $0,5\text{ кГц}$). Показание $U_{\text{вых}}$ вольтметра $PV2$ схемы для $f = 0,5\text{ кГц}$ занести в таблицу 4.3.

Таблица 4.3 – Экспериментальные и расчетные данные

$f, \text{ кГц}$	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$									
A									

11. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом 1 кГц и поддерживая постоянным значение $U_{\text{вх}} = 10\text{ В}$, измерить значения $U_{\text{вых}}$ и занести их в таблицу 4.3.

12. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать схему моста Вина – Робинсона.

13. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи моста Вина – Робинсона и занести их в таблицу 4.3.

14. По данным таблицы 4.2 построить АЧХ $A(f)$ полосового RC-фильтра, по данным таблицы 4.3 построить АЧХ $A(f)$ моста Вина – Робинсона.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема полосового RC-фильтра (рис. 4.3).
3. Расчет квазирезонансной частоты f_0 полосового RC-фильтра и моста Вина – Робинсона по (4.1).
4. Таблица 4.1 с параметрами схемы.
5. Таблица 4.2 с экспериментальными и расчетными данными полосового RC-фильтра.
6. Схема моста Вина – Робинсона (рис. 4.4).
7. Таблица 4.3 с экспериментальными и расчетными данными моста Вина – Робинсона.
8. АЧХ $A(f)$ схемы полосового RC-фильтра по данным таблицы 4.2.
9. АЧХ $A(f)$ схемы моста Вина – Робинсона по данным таблицы 4.3.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение частотного электрического фильтра, коэффициента передачи и АЧХ частотного электрического фильтра.
2. Изобразить и пояснить построение АЧХ ПФ.

3. Сформулировать определение ПФ и пояснить принцип действия полосового RC-фильтра.

4. Пояснить принцип действия моста Вина – Робинсона.

Лабораторная работа 5 ***Исследование заграждающего LC-фильтра***

Цель работы: изучение принципа работы схемы заграждающего LC-фильтра, экспериментальное получение его АЧХ.

Теоретические сведения

Заграждающий фильтр (ЗФ) – частотный электрический фильтр, пропускающий электрические сигналы любой частоты, кроме сигналов, находящихся в полосе частот вблизи квазирезонансной частоты. АЧХ идеального ЗФ изображена на рисунке 5.1.

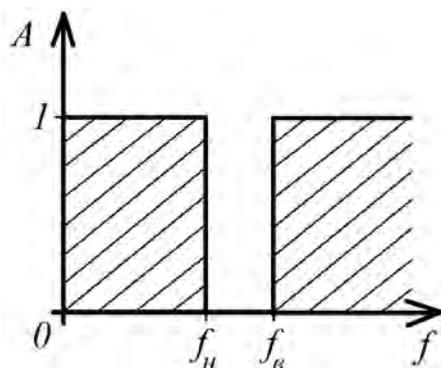


Рисунок 5.1 – АЧХ идеального ЗФ

Схема заграждающего LC-фильтра представляет собой комбинацию схем ФВЧ и ФНЧ. При этом продольное сопротивление такого частотного электрического фильтра состоит из параллельно соединенных катушки индуктивности и конденсатора, а поперечное сопротивление представляет собой последовательное соединение таких же элементов (рис. 5.2).

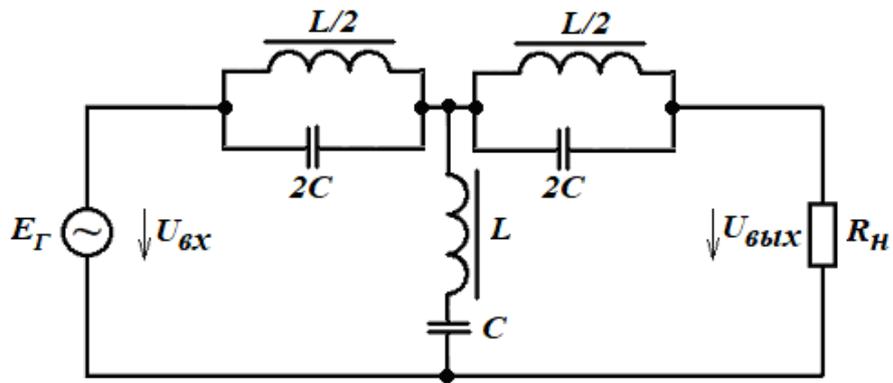


Рисунок 5.2 – Схема заграждающего LC-фильтра

Параметры последовательных и параллельных контуров подбираются такими, чтобы они были настроены на одну и ту же частоту, называемую квазирезонансной частотой:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.1)$$

На квазирезонансной частоте параллельный контур обладает бесконечно большим сопротивлением, тогда как сопротивление последовательного контура стремится к нулю, следовательно, сигналы частот, близких к квазирезонансной частоте, не будут пропускаться фильтром в нагрузку. При отклонении частоты сигналов от квазирезонансной частоты в сторону низких или высоких частот сопротивление параллельного контура будет уменьшаться, а последовательного увеличиваться, что приведет к пропусканию сигнала в нагрузку.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему заграждающего LC-фильтра, представленную на рисунке 5.3.

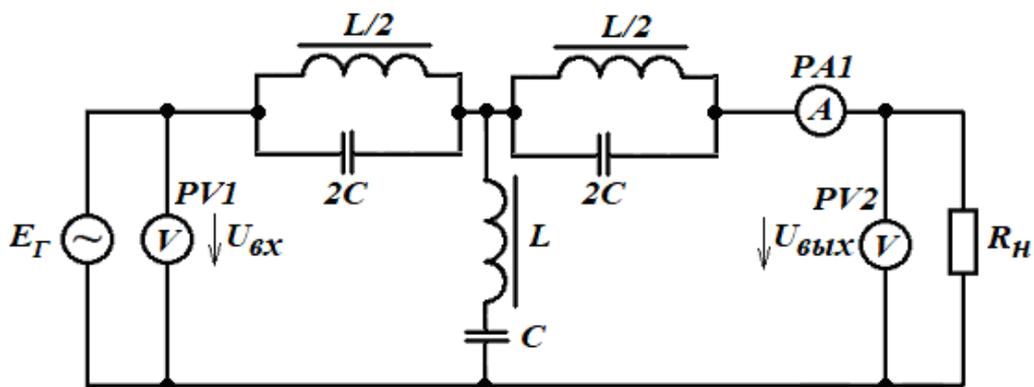


Рисунок 5.3 – Схема заграждающего LC-фильтра

2. Используя значения индуктивности L и емкости C из таблицы 5.1, определить расчетное значение квазирезонансной частоты $f_{0расч}$ по (5.1) и значение характеристического сопротивления K по (1.3) заграждающего LC-фильтра и занести их в таблицу 5.1.

Таблица 5.1 – Параметры схемы

L , мГн	C , мкФ	K , Ом	$f_{0расч}$, кГц	$f_{0эксп}$, кГц	f_H , кГц	$f_в$, кГц	Δf , кГц
10	0,25						

3. Собрать схему заграждающего LC-фильтра с учетом данных таблицы 5.1. В качестве источника E_G использовать блок переменного напряжения стенда УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Катушки индуктивности и конденсаторы выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах) или установить из блоков переменной индуктивности и переменной емкости стенда. Резистор нагрузки установить из блока переменного сопротивления стенда, его сопротивление R_H установить равным характеристическому сопротивлению K из таблицы 5.1.

4. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра PVI , подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 3 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять $0,5\text{ кГц}$). Показания измерительных приборов схемы $U_{вых}$ и I для $f = 0,5\text{ кГц}$ занести в таблицу 5.2.

Таблица 5.2 – Экспериментальные и расчетные данные

f , кГц	0,5	1,5	2,5	3,5	4,5	5,5	6,5	7,5	8,5
$U_{вх}$, В	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{вых}$, В									
I , мА									
A									

5. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом 1 кГц и поддерживая постоянным значение $U_{вх} = 10\text{ В}$, измерить значения $U_{вых}$ и I и занести их в таблицу 5.2.

6. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать схему заграждающего LC-фильтра.

7. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи заграждающего LC-фильтра и занести их в таблицу 5.2.

8. По данным таблицы 5.2 построить АЧХ $A(f)$ заграждающего LC-фильтра.

9. По графику АЧХ, в соответствии с рисунком 5.4, на уровне $0,7A_{max}$ определить значения нижней f_H и верхней f_B граничных частот и занести их в таблицу 5.1.

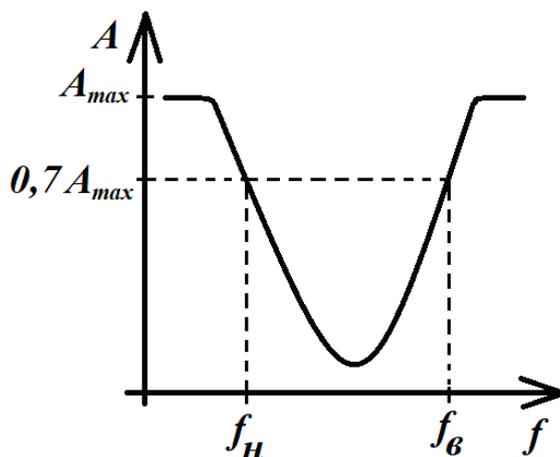


Рисунок 5.4 – Определение полосы затухания

10. Рассчитать по (3.2) значение полосы затухания Δf , по (3.1) экспериментальное значение квазирезонансной частоты $f_{0_{экс}}$ заграждающего LC-фильтра и занести их в таблицу 5.1.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема заграждающего LC-фильтра (рис. 5.3).
3. Расчет квазирезонансной частоты $f_{0_{расч}}$ по (5.1) и характеристического сопротивления K по (1.3) заграждающего LC-фильтра.
4. Таблица 5.1 с параметрами схемы.
5. Таблица 5.2 с экспериментальными и расчетными данными схемы заграждающего LC-фильтра.
6. АЧХ $A(f)$ заграждающего LC-фильтра по данным таблицы 5.2 с построениями в соответствии с рисунком 5.4.
7. Расчет по (3.2) полосы затухания Δf , по (3.1) экспериментального значения квазирезонансной частоты $f_{0_{экс}}$ заграждающего LC-фильтра.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение частотного электрического фильтра, коэффициента передачи и АЧХ частотного электрического фильтра.

2. Изобразить и пояснить построение АЧХ ЗФ.
3. Сформулировать определение ЗФ и пояснить принцип действия схемы заграждающего LC-фильтра.
4. Сформулировать определение и пояснить расчет полосы затухания заграждающего LC-фильтра.

Лабораторная работа 6

Исследование двойного Т-образного моста

Цель работы: изучение принципа работы двойного Т-образного моста, экспериментальное получение его фазо-частотной характеристики (ФЧХ) и АЧХ.

Теоретические сведения

Двойной Т-образный мост относится к категории заграждающих фильтров (ЗФ) – частотных электрических фильтров, пропускающих электрические сигналы любой частоты, кроме сигналов, находящихся в полосе частот вблизи квазирезонансной частоты. АЧХ идеального ЗФ изображена на рисунке 5.1.

Схема двойного Т-образного моста представляет собой параллельное соединение Т-образных RC-звеньев ФНЧ и ФВЧ (рис. 6.1) и имеет частотные характеристики, идентичные характеристикам моста Вина – Робинсона. В отличие от моста Вина – Робинсона выходное напряжение здесь снимается относительно общей точки.

Параметры обоих Т-образных RC-звеньев моста подбираются такими, чтобы они были настроены на одну и ту же частоту, называемую квазирезонансной частотой, и при условии равенства $R_1 = R_2 = R$, $R_3 = R/2$, $C_1 = C_2 = C$ и $C_3 = 2C$ рассчитываемую по (4.1).

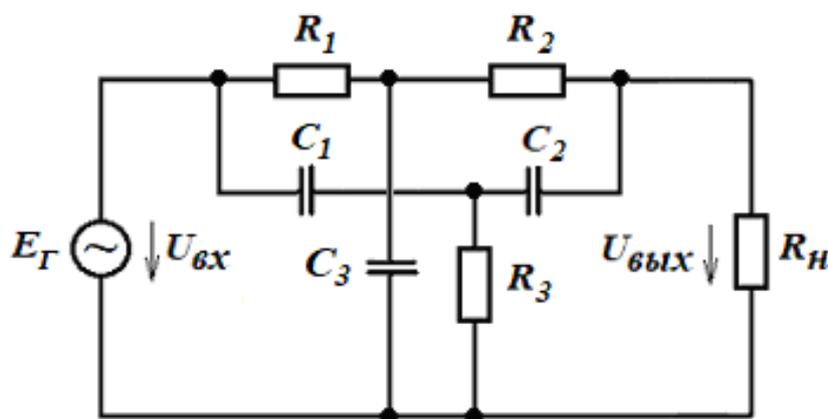


Рисунок 6.1 –Схема двойного Т-образного моста

Сигналы частот, близких к квазирезонансной частоте, не будут пропускаться мостом в нагрузку.

При подаче на вход схемы сигнала с частотой, ниже квазирезонансной, емкостное сопротивление конденсаторов будет увеличиваться, и сигнал пройдет в нагрузку через резисторы R_1 и R_2 . Для минимизации потерь сигнала в резисторах моста должно быть обеспечено условие $R_H \gg R_1 + R_2$.

При подаче на вход схемы сигнала с частотой, выше квазирезонансной, емкостное сопротивление конденсаторов будет уменьшаться, и сигнал пройдет в нагрузку через конденсаторы C_1 и C_2 .

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему двойного Т-образного моста, представленную на рисунке 6.2.

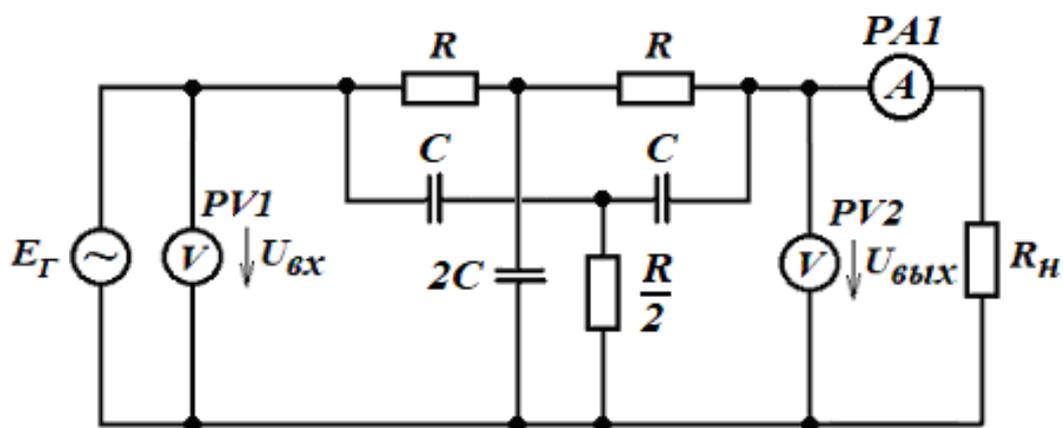


Рисунок 6.2 – Схема двойного Т-образного моста

2. Используя значения сопротивления R и емкости C из таблицы 6.1, определить по (4.1) расчетное значение квазирезонансной частоты $f_{0расч}$ двойного Т-образного моста и занести его в таблицу 6.1.

Таблица 6.1 – Параметры схемы

R , Ом	C , мкФ	R_H , Ом	$f_{0расч}$, кГц	$f_{0эсп}$, кГц	f_H , кГц	$f_в$, кГц	Δf , кГц
200	0,25						

3. Собрать схему двойного Т-образного моста с учетом данных таблицы 6.1. В качестве источника E_T использовать блок переменного напряжения стенда УИЛС-1 (регулятор «Напряжение» установить в крайнее левое положение, регулятор «Плавно» – в крайнее правое положение, регулятор «Частота» – в положение «0»). Резисторы и конденсаторы двойного Т-образного моста выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых

корпусах) или установить из блоков переменного сопротивления и переменной емкости стенда. Резистор нагрузки R_n выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах) сопротивлением не менее 750 Ом или установить из блока переменного сопротивления стенда. Значение R_n занести в таблицу 6.1.

4. Включить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра PVI , подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 3 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять $0,5 \text{ кГц}$). Показания измерительных приборов схемы $U_{\text{вых}}$ и I для $f = 0,5 \text{ кГц}$ занести в таблицу 6.2.

Таблица 6.2 – Экспериментальные и расчетные данные

$f, \text{ кГц}$	0,17	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_{\text{вх}}, \text{ В}$	10	10	10	10	10	10	10	10	10
$U_{\text{вых}}, \text{ В}$									
$I, \text{ мА}$									
A									
$\varphi, ^\circ$									

5. Изменяя регулятором «Частота» частоту входного напряжения с интервалом 1 кГц и поддерживая постоянным значение $U_{\text{вх}} = 10 \text{ В}$, измерить значения $U_{\text{вых}}$ и I , и занести их в таблицу 6.2.

6. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать схему двойного Т-образного моста.

7. По (1.1) рассчитать значения коэффициента передачи двойного Т-образного моста и занести их в таблицу 6.2.

8. По данным таблицы 6.2 построить АЧХ $A(f)$ двойного Т-образного моста.

9. По графику АЧХ, в соответствии с рисунком 5.4, на уровне $0,7A_{\text{max}}$ определить значения нижней f_n и верхней f_e граничных частот и занести их в таблицу 6.1.

10. Рассчитать по (3.2) значение полосы затухания Δf , по (3.1) экспериментальное значение квазирезонансной частоты $f_{0\text{эксн}}$ двойного Т-образного моста и занести их в таблицу 6.1.

11. По формуле $\varphi = \arctg \frac{4(2\pi fRC)}{(2\pi fRC)^2 - 1}$ определить значения угла сдвига

фаз между выходным и входным сигналами двойного Т-образного моста и занести их в таблицу 6.2.

12. По данным таблицы 6.2 построить ФЧХ $\varphi(f)$ двойного Т-образного моста.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема двойного Т-образного моста (рис. 6.2).
3. Расчет по (4.1) квазирезонансной частоты $f_{0расч}$ двойного Т-образного моста.
4. Таблица 6.1 с параметрами схемы.
5. Таблица 6.2 с экспериментальными и расчетными данными схемы двойного Т-образного моста.
6. АЧХ $A(f)$ двойного Т-образного моста по данным таблицы 6.2 с построениями в соответствии с рисунком 5.4.
7. Расчет по (3.2) полосы затухания Δf , по (3.1) экспериментального значения квазирезонансной частоты $f_{0эксп}$ двойного Т-образного моста.
8. ФЧХ $\varphi(f)$ двойного Т-образного моста по данным таблицы 6.2.

Контрольные вопросы

1. Сформулировать определение частотного электрического фильтра, коэффициента передачи и АЧХ частотного электрического фильтра.
2. Изобразить и пояснить построение АЧХ ЗФ.
3. Сформулировать определение ЗФ и пояснить принцип действия схемы двойного Т-образного моста.
4. Сформулировать определение и пояснить расчет полосы затухания двойного Т-образного моста.
5. Изобразить и пояснить построение ФЧХ двойного Т-образного моста.

Лабораторная работа 7

Анализ цепи несинусоидального тока

Цель работы: исследование несинусоидальной периодической функции напряжения в цепи, имеющей активно-индуктивный характер нагрузки; применение графоаналитического метода разложения несинусоидальных функций в ряд Фурье.

Теоретические сведения

В электронных цепях, использующихся для передачи и обработки информации, электрические сигналы имеют, как правило, несинусоидальную форму. Искажения формы синусоидального напряжения или тока могут

происходить и в процессе выработки, распределения и потребления электроэнергии.

Методы расчета, используемые для сигналов синусоидальной формы, в таких цепях неприменимы. Анализ цепей, в которых действуют несинусоидальные периодические ЭДС, напряжения и токи, проводят, используя разложение несинусоидальных кривых в ряд Фурье. Периодическую функцию $f(t)$ представляют в виде суммы гармоник кратных частот и, если цепь линейна, рассчитывают ее для каждой гармоники в отдельности, а затем суммируют полученные результаты.

Если периодическая несинусоидальная функция отвечает условиям Дирихле (имеет на всяком конечном интервале конечное число разрывов первого рода и конечное число максимумов и минимумов), она может быть представлена гармоническим рядом Фурье в тригонометрической форме:

$$f(t) = A_0 + A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + A_{2m} \sin(2\omega t + \psi_2) + \dots + A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k), \quad (7.1)$$

где A_0 – постоянная составляющая функции $f(t)$; $A_{1m} \sin(\omega t + \psi_1)$ – первая (основная) гармоника; $A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k)$ – высшая гармоника (k -я гармоника); A_{km} и ψ_k – амплитуда и начальная фаза k -й гармоники.

Так как

$$A_{km} \sin(k\omega t + \psi_k) = A_{km} \cos \psi_k \sin k\omega t + A_{km} \sin \psi_k \cos k\omega t = B_{km} \sin k\omega t + C_{km} \cos k\omega t,$$

то ряд (7.1) может быть записан в виде:

$$f(t) = A_0 + B_{1m} \sin \omega t + B_{2m} \sin 2\omega t + \dots + B_{km} \sin k\omega t + \dots + C_{1m} \cos \omega t + C_{2m} \cos 2\omega t + \dots + C_{km} \cos k\omega t + \dots = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} B_{km} \sin k\omega t + \sum_{k=1}^{\infty} C_{km} \cos k\omega t. \quad (7.2)$$

Постоянную составляющую A_0 и коэффициенты B_{km} и C_{km} можно вычислить при помощи интегралов:

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) d\omega t; \quad (7.3)$$

$$B_{km} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin k\omega t dt = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \sin k\omega t d\omega t;$$

$$C_{km} = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos k\omega t dt = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(\omega t) \cos k\omega t d\omega t.$$

Рассчитав значения A_0 , B_{km} и C_{km} , можно перейти от (7.2) к (7.1). При этом амплитуда A_{km} и начальная фаза ψ_k k -й гармоники определяются:

$$A_{km} = \sqrt{B_{km}^2 + C_{km}^2};$$

$$\psi_k = \arctg \frac{C_{km}}{B_{km}}. \quad (7.4)$$

Периодические кривые стандартной формы (треугольной, прямоугольной и т. п.) имеют относительно простое аналитическое описание. Их разложение в ряд Фурье производят графоаналитическим методом, предполагающим замену определенного интеграла в формулах (7.3) суммой конечного числа слагаемых.

Порядок выполнения работы

1. Изобразить в отчете по лабораторной работе схему исследования несинусоидальной периодической функции напряжения в цепи, имеющей активно-индуктивный характер нагрузки (рис. 7.1).

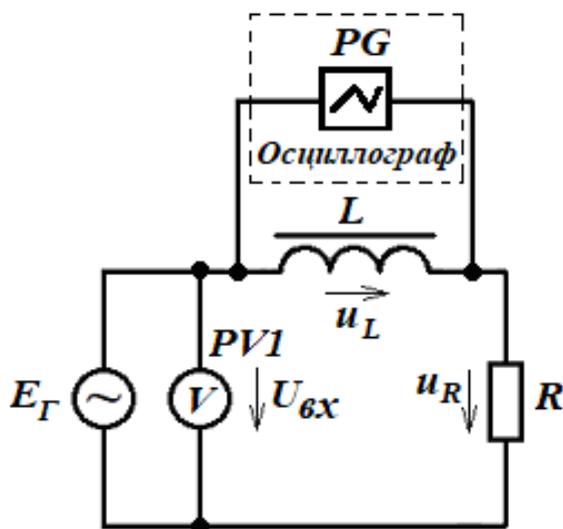


Рисунок 7.1 – Схема исследования несинусоидальной периодической функции

2. Собрать схему, изображенную на рисунке 7.1. В качестве источника E_T использовать «Блок переменного напряжения» стенда УИЛС-1 (регуляторы «Напряжение» и «Плавно» установить в крайнее левое положение, регулятор «Частота» – в положение «1»). Катушку индуктивности $L = 20$ мГн выбрать из элементов наборного поля (в пластмассовых корпусах) или установить из блока

переменной индуктивности стенда. Резистор $R = 50 \text{ Ом}$ установить из блока переменного сопротивления стенда.

3. Включить «Блок переменного напряжения» и измерительные приборы стенда. На вход цепи, контролируя с помощью вольтметра PVI , подать однофазное переменное напряжение 10 В (при указанном в п. 2 положении регуляторов значение частоты данного напряжения будет составлять 1 кГц). Регулятор горизонтального масштаба осциллографа установить в положение $0,2 \text{ мс/дел}$, регулятор вертикального масштаба – 5 В/дел .

4. Получив на экране осциллографа график несинусоидального напряжения (рисунок 7.2), регулятором «Плавно» установить длительность его периода в пределах 10 клеток горизонтальной сетки-шкалы осциллографа

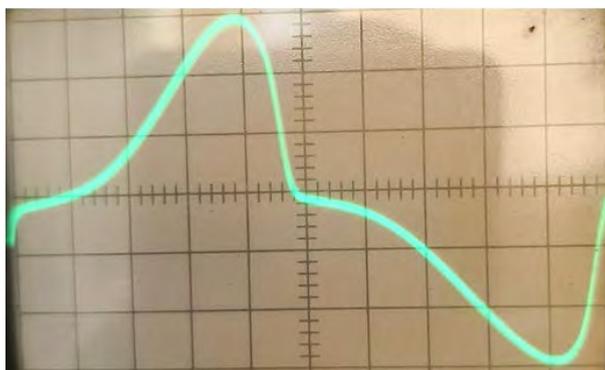


Рисунок 7.2 – График несинусоидального напряжения на экране осциллографа

5. Изобразить в отчете по лабораторной работе полученный график несинусоидального напряжения (в соответствии с рис. 7.3).

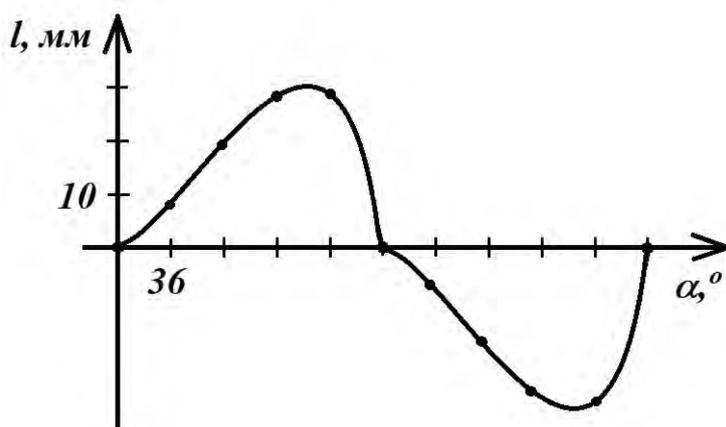


Рисунок 7.3 – График несинусоидального напряжения

6. Отключить блок переменного напряжения и измерительные приборы стенда, разобрать схему исследования несинусоидальной периодической функции.

7. С учетом значений длительности периода напряжения, равного 10 делениям (клеткам) сетки-шкалы осциллографа, и горизонтального масштаба осциллографа $m_t = 0,2 \text{ мс/дел}$, рассчитать значение частоты несинусоидального напряжения на катушке индуктивности по формуле $f = \frac{1}{T} = \frac{1}{10m_t}$ и занести его в таблицу 7.1. По формуле $\omega = 2\pi f$ рассчитать значение угловой частоты несинусоидального напряжения на катушке индуктивности и занести его в таблицу 7.1.

Таблица 7.1 – Параметры несинусоидальной функции

Гармоники	Параметры сигнала						
	$f, \text{ Гц}$	$\omega, \text{ рад/с}$	$B_{km}, \text{ мм}$	$C_{km}, \text{ мм}$	$A_{km}, \text{ мм}$	$U_{km}, \text{ В}$	$\psi_{k_0}^{\circ}$
Первая ($k=1$)							
Третья ($k=3$)							
Пятая ($k=5$)							

8. Провести разложение полученной несинусоидальной периодической функции напряжения на катушке индуктивности в ряд Фурье в соответствии со следующей методикой:

– период напряжения разделить на определенное количество p равных частей (например, $p = 10$) и обозначить соответствующие точки на графике (рис. 7.3). Так как функция симметрична относительно оси абсцисс (рис. 7.4), она раскладывается в тригонометрический ряд, который не содержит чётных гармоник ($k = 2, 4, 6, \dots$) и постоянной составляющей ($A_0 = 0$), а расчет проводится только для половины периода функции;

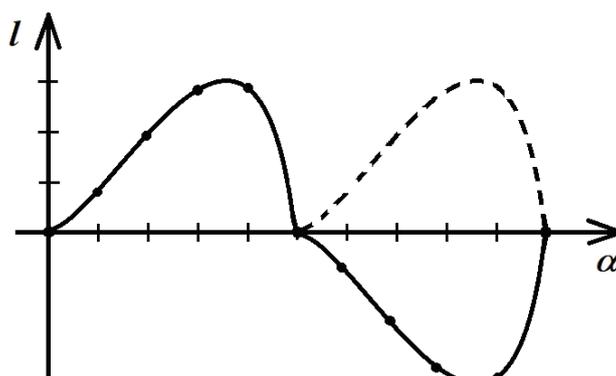


Рисунок 7.4 – График несинусоидальной функции, симметричной относительно оси абсцисс

– по графику функции (рис. 7.3) определить параметры для расчета коэффициентов B_{km} и C_{km} , составляющих амплитуду k -й гармоники (в данном

случае 1, 3 и 5-й гармоник) и занести их в таблицу 7.2 (где l_n – ордината n -й точки графика функции);

Таблица 7.2 – Параметры для расчета коэффициентов амплитуд гармоник

n	Гармоники									$l_n,$ мм	$l_n^2,$ мм ²
	Первая			Третья			Пятая				
	$\alpha,$ $^\circ$	$\sin \alpha$	$\cos \alpha$	$3\alpha,$ $^\circ$	$\sin 3\alpha$	$\cos 3\alpha$	$5\alpha,$ $^\circ$	$\sin 5\alpha$	$\cos 5\alpha$		
1	36	0,59	0,81	108	0,95	-0,31	180	0	-1		
2	72	0,95	0,31	216	-0,59	-0,81	0	0	1		
3	108	0,95	-0,31	324	-0,59	0,81	180	0	-1		
4	144	0,59	-0,81	72	0,95	0,31	0	0	1		
5	180	0	-1	180	0	-1	180	0	-1		

– по формулам:

$$B_{1m} = \frac{4}{p} \sum_{n=1}^{p/2} l_n \sin \alpha; C_{1m} = \frac{4}{p} \sum_{n=1}^{p/2} l_n \cos \alpha; A_{1m} = \sqrt{B_{1m}^2 + C_{1m}^2}; \psi_1 = \arctg \frac{C_{1m}}{B_{1m}}$$

рассчитать коэффициенты B_{1m} и C_{1m} , амплитуду A_{1m} , начальную фазу ψ_1 1-й гармоники и занести их в таблицу 7.1;

– по формулам:

$$B_{3m} = \frac{4}{p} \sum_{n=1}^{p/2} l_n \sin 3\alpha; C_{3m} = \frac{4}{p} \sum_{n=1}^{p/2} l_n \cos 3\alpha; A_{3m} = \sqrt{B_{3m}^2 + C_{3m}^2}; \psi_3 = \arctg \frac{C_{3m}}{B_{3m}}$$

рассчитать коэффициенты B_{3m} и C_{3m} , амплитуду A_{3m} , начальную фазу ψ_3 3-й гармоники и занести их в таблицу 7.1;

– по формулам:

$$B_{5m} = \frac{4}{p} \sum_{n=1}^{p/2} l_n \sin 5\alpha; C_{5m} = \frac{4}{p} \sum_{n=1}^{p/2} l_n \cos 5\alpha; A_{5m} = \sqrt{B_{5m}^2 + C_{5m}^2}; \psi_5 = \arctg \frac{C_{5m}}{B_{5m}}$$

рассчитать коэффициенты B_{5m} и C_{5m} , амплитуду A_{5m} , начальную фазу ψ_5 5-й гармоники и занести их в таблицу 7.1;

– рассчитать среднеквадратичное значение ординат точек графика несинусоидальной периодической функции и масштаб его вертикальной оси по формулам:

$$l_{\text{ср.кв.}} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^5 l_n^2}{5}} \text{ [мм]}, \quad m_u = \frac{U}{l_{\text{ср.кв.}}} \text{ [В/мм]};$$

– по формулам:

$$U_{1m} = A_{1m} \cdot m_u; \quad U_{3m} = A_{3m} \cdot m_u; \quad U_{5m} = A_{5m} \cdot m_u$$

рассчитать амплитудные значения U_{km} напряжений 1, 3 и 5-й гармоник и занести их в таблицу 7.1;

– записать с учетом данных таблицы 7.1 выражение мгновенного значения исследуемого несинусоидального напряжения в виде ряда Фурье (ограничившись тремя членами ряда) в соответствии с формулой:

$$u_L = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_1) + U_{3m} \sin(3\omega t + \psi_3) + U_{5m} \sin(5\omega t + \psi_5).$$

9. Построить диаграмму амплитудно-частотного спектра несинусоидальной функции по аналогии с рисунком 7.5:

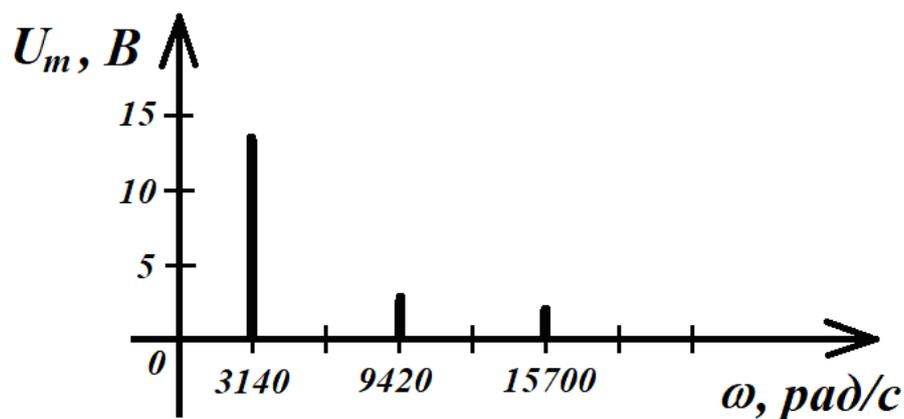


Рисунок 7.5 – Диаграмма амплитудно-частотного спектра несинусоидальной функции

10. Построить диаграмму фазочастотного спектра несинусоидальной функции по аналогии с рисунком 7.6:

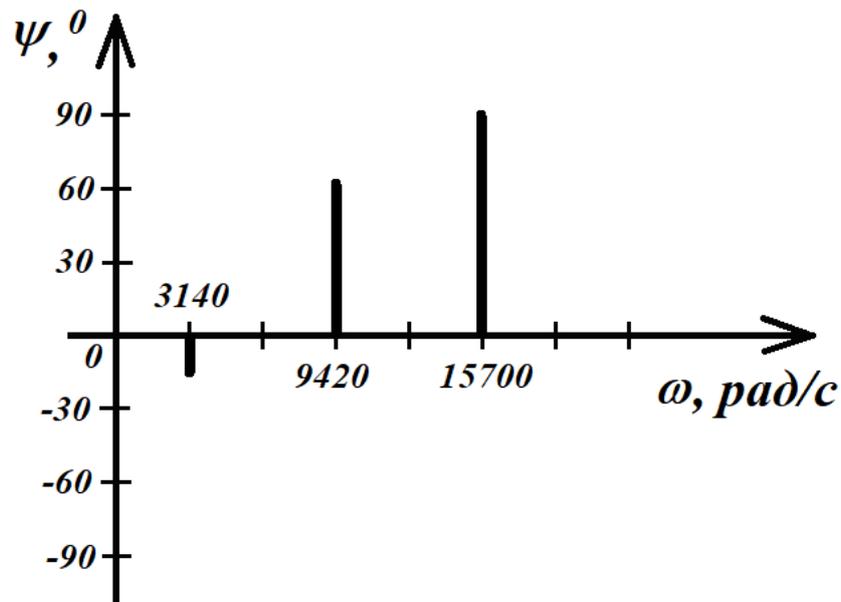


Рисунок 7.6 – Диаграмма фазочастотного спектра несинусоидальной функции

11. По аналогии с рисунком 7.7 построить:

– графики синусоидальных функций 1, 3 и 5-й гармоник, используя параметры таблицы 7.1 (на рис. 7.7 обозначены соответственно номерами 1, 2 и 3);

– график несинусоидальной функции, суммируя ординаты графиков 1, 3 и 5-й гармоник (на рис. 7.7 обозначен номером 4).

При построении графиков функций возможно использование табличного процессора MS Excel.

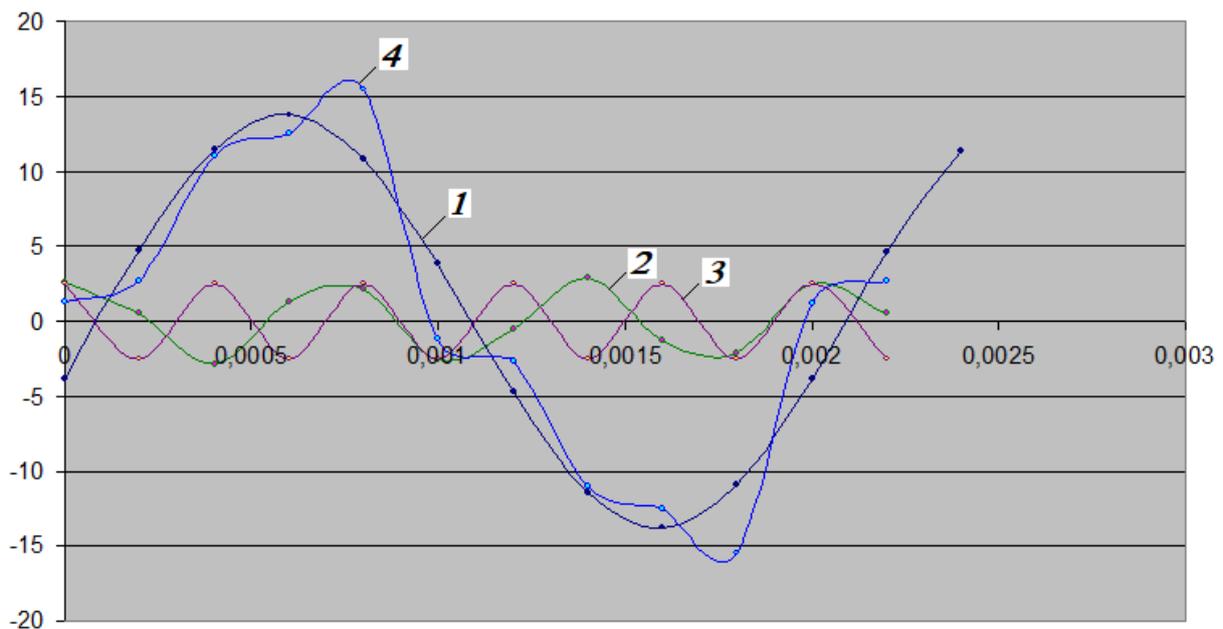


Рисунок 7.7 – Графики несинусоидальной и синусоидальных функций

Сравнить построенный график несинусоидальной функции с изображенным ранее в отчете по лабораторной работе графиком несинусоидального напряжения катушки индуктивности, полученным на экране осциллографа.

Содержание отчета

1. Название и цель работы.
2. Схема исследования несинусоидальной периодической функции (рис. 7.1).
3. График несинусоидального напряжения (в соответствии с рис. 7.3).
4. Таблица 7.1 с параметрами несинусоидальной функции.
5. Расчет частоты f и угловой частоты ω несинусоидального напряжения на катушке индуктивности (по формулам п. 7 порядка выполнения работы).
6. Таблица 7.2 с параметрами для расчета коэффициентов амплитуд гармоник.
7. Разложение несинусоидальной периодической функции напряжения на катушке индуктивности в ряд Фурье (по формулам п. 8 порядка выполнения работы).
8. Диаграмма амплитудно-частотного спектра несинусоидальной функции.
9. Диаграмма фазочастотного спектра несинусоидальной функции.
10. Графики несинусоидальной и синусоидальных функций (по аналогии с рис. 7.7).

Литература

1. Борисов, Ю. М. Электротехника : учебник для студентов неэлектротехнических спец. вузов / Ю. М. Борисов, Д. Н. Липатов, Ю. Н. Зорин. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1985. – 552 с.
2. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и устройства : учебное пособие для студентов вузов, обучающихся по специальности «Промышленная электроника» / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – Москва : Высшая школа, 1989. – 287 с.
3. Исследование электрических фильтров : методические указания к лабораторным работам по курсу «Электротехника и основы электроники» / ВТИЛП ; сост. А. В. Ильющенко. – Витебск, 1994. – 8 с.
4. Цепи несинусоидального периодического тока : практическое пособие по выполнению лабораторных работ по курсу «Теоретические основы электротехники» для студентов электротехнических специальностей дневной и заочной форм обучения / авт.-сост.: С. А. Грачев, В. В. Соленков. – Гомель : ГГТУ им. П. О. Сухого, 2006. – 32 с.
5. Частотные фильтры : методические указания к лабораторным работам для студентов спец. 1-53.01.01-05 «Автоматизация технологических процессов и производств (легкая промышленность)» / УО «ВГТУ» ; сост. А. В. Ильющенко. – Витебск, 2005. – 30 с.
6. Электротехника : учебное пособие для студентов неэлектрических специальностей вузов / М. Ю. Анвельт, В. Г. Герасимов, В. П. Данильченко [и др.] ; под ред. В. С. Пантюшина. – Изд. 2-е, перераб. и доп. – Москва : Высшая школа, 1976. – 560 с.

Учебное издание

ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

***ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ФИЛЬТРЫ.
НЕСИНУСОИДАЛЬНЫЕ ТОКИ***

Методические указания

Составители:

Виталий Федорович Куксевич
Юрий Васильевич Новиков

Редактор *Р.А. Никифорова*
Корректор *А.С. Прокопюк*
Компьютерная верстка *В.Ф. Куксевич*

Подписано к печати 10.03.2026. Формат 60x90¹/₁₆. Усл. печ. листов 2,6.
Уч.-изд. листов 3,2. Тираж 30 экз. Заказ № 55.

Учреждение образования «Витебский государственный технологический университет»
210038, г. Витебск, Московский пр., 72.

Отпечатано на ризографе учреждения образования

«Витебский государственный технологический университет».

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 1/172 от 12 февраля 2014 г.

Свидетельство о государственной регистрации издателя, изготовителя,
распространителя печатных изданий № 3/1497 от 30 мая 2017 г.