

Национальный исследовательский университет «МЭИ»
Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова
Кафедра Основ радиотехники

**Методические указания к лабораторным работам
по курсу
«Основы теории цепей»**

СОДЕРЖАНИЕ

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «ЛОЦМАН»	3
<i>Лабораторная работа № 1</i>	
РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА	4
<i>Лабораторная работа № 2</i>	
РС-ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ	7
<i>Лабораторная работа № 3</i>	
ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ РС-ЦЕПЕЙ.....	11
<i>Лабораторная работа № 4</i>	
ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА	14
<i>Лабораторная работа № 5</i>	
СВОБОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ.....	18
<i>Лабораторная работа № 6</i>	
ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ	22
<i>Лабораторная работа № 7</i>	
ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ	26
<i>Лабораторная работа № 8</i>	
СТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ.....	30
ЛИТЕРАТУРА	34
<i>Приложение 1</i>	35
<i>Приложение 2</i>	37
<i>Приложение 3</i>	43
<i>Приложение 4</i>	48
Инструкция для работы с цифровым осциллографом Hantek DSO4072C.....	53

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ ЛАБОРАТОРНЫЙ СТЕНД «ЛОЦМАН»

Универсальный лабораторный стенд «Лоцман» предназначен для выполнения лабораторных работ по теории электрических цепей.

Основная часть стенда – коммутационная панель, на которой размещены схемные элементы: резисторы (постоянные и переменные), конденсаторы, катушки индуктивности, трансформатор, диоды. Соединение элементов схем производится с помощью проводников со штекерами, подключаемыми к гнездам коммутационной панели. На передней панели расположены вольтметр и миллиамперметр постоянного тока, три регулируемых источника постоянного напряжения (0–5 В), генератор прямоугольных импульсов (длительность 1,5 мс), генератор коротких импульсов (длительность около 1 мкс). На стенде имеются гнезда для подключения генератора гармонических колебаний, вольтметров переменного напряжения и осциллографа.

Стенд питается от сети переменного напряжения 220 В, выключатель питания находится с задней стороны стенда.

Значения параметров схемных элементов приведены в табл. 1.

Таблица 1

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
№ стенда	А	В	С	Д	Е	F	G	Н
R_1, R_3 , кОм	3,3	3,6	3,6	2,2	2,0	3,0	3,6	2,0
R_2 , кОм	1,65	1,8	1,8	1,1	1,0	1,5	1,8	1,0
R_4, R_5 , кОм	1,2	1,2	0,91	1,0	0,82	0,75	0,68	0,91
R_6 , кОм	30							
R_7 , кОм	300							
R_8 , Ом	36							
C_1, C_2 , нФ	2,4	2,2	2,0	3,0	3,0	2,7	2,7	3,0
C_3 , нФ	4,8	4,4	4,0	6,0	6,0	5,4	5,4	6,6
C_4 , нФ	30	30	30	50	50	30	30	50
C_5 , нФ	1,0							
L_1, L_2 , мГн	1,77							

Лабораторная работа № 1

РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

Цель работы:

- 1) освоить методы анализа разветвленных цепей и понятие об эквивалентном генераторе;
- 2) получить практические навыки работы с электрическими цепями и проведения измерений токов и напряжений;
- 3) освоить способ экспериментального определения параметров эквивалентного генератора.

Объект исследования: резистивная цепь, содержащая три источника постоянных ЭДС (рис. 1).

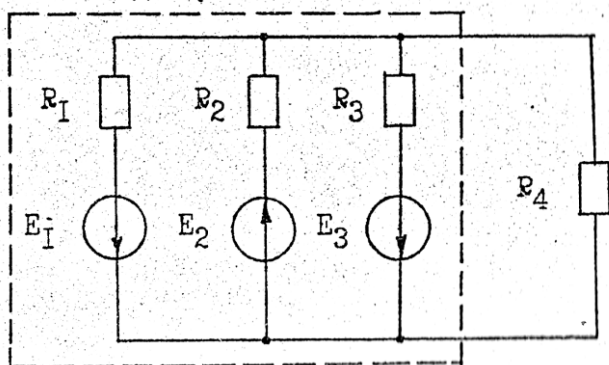


Рис. 1

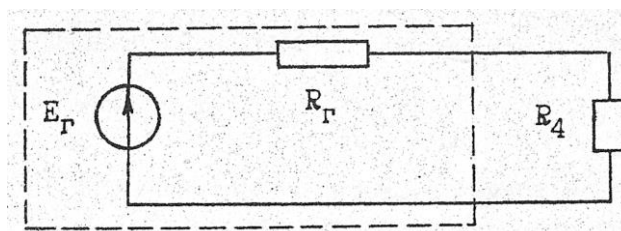


Рис. 2

Домашнее задание

1. Изобразите принципиальную схему исследуемой цепи с указанием номинальных значений параметров элементов, приведенных в описании универсального лабораторного стенда «Лощман» и в табл. 2.

Таблица 2

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
$E_1, \text{ В}$	3,0	3,2	3,4	2,8	3,2	3,0	3,4	2,8
$E_2, \text{ В}$	2,0	1,8	2,2	2,0	2,2	2,2	1,8	2,2
$E_3, \text{ В}$	4,0	3,8	4,0	3,8	4,2	3,6	4,0	2,8

2. Рассчитайте токи в ветвях цепи и напряжения на всех ее элементах для заданных значений напряжения источников ЭДС¹.

Результаты расчета занесите в таблицу 3.

Таблица 3

	R_1		R_2		R_3		R_4	
	Расч.	Измер.	Расч.	Измер.	Расч.	Измер.	Расч.	Измер.
$I, \text{мА}$								
$U, \text{В}$								

3. Рассчитайте параметры E_{Γ} и R_{Γ} эквивалентного генератора, которым можно заменить участок цепи, подключенный к резистору R_4 . Результаты расчета занесите в таблицу 4.

Таблица 4

	Расчет	Эксперимент
$E_{\Gamma}, \text{В}$		
$R_{\Gamma}, \text{Ом}$		

Лабораторное задание

1. Соберите исследуемую цепь (рис. 1), включите лабораторный стенд и установите заданные в табл. 2 напряжения источников (обратите внимание на полярности источников).

2. Измерьте напряжения на резисторах и токи в ветвях цепи, занесите измеренные значения в табл. 3 и сравните с результатами расчета.

3. Экспериментально определите параметры E_{Γ} и R_{Γ} , входящие в эквивалентную схему (рис. 2) исследуемой цепи. Результаты измерения занесите в таблицу 4 и сопоставьте с расчетными значениями.

4. Загрузите в пакет «MathCad» файл «Results_1.xmcd». Введите исходные данные (сопротивления резисторов и значения источников ЭДС) и результаты измерений, полученные в пп. 2 и 3. Оцените максимальные погрешности измерений.

5. Сделайте выводы по проделанной работе.

¹ Здесь и далее для расчета можно воспользоваться программой обработки результатов «Results_1.xmcd», листинг которой представлен в Приложении 1.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) схемы исследованных цепей;
- 2) вывод расчетных соотношений;
- 3) таблицы расчетных и измеренных значений напряжений и токов, а также параметров эквивалентного генератора;
- 4) выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Изложите существо метода контурных токов. В каких случаях его целесообразно применять?
2. Изложите существо метода узловых потенциалов. В каких случаях его целесообразно применять?
3. Каким образом рассчитать параметры эквивалентного генератора с источником ЭДС? С источником тока?
4. Каким образом измерить параметры эквивалентного генератора с источником ЭДС? С источником тока?
5. Каким должно быть значение ЭДС E_2 (рис. 1), чтобы ток через резистор R_4 был равен нулю?

Лабораторная работа № 2

RC-ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Цель работы:

- 1) освоить комплексный метод расчета напряжений и токов в линейной цепи при воздействии гармонических колебаний;
- 2) освоить метод измерения амплитуд и разности фаз гармонических колебаний с помощью осциллографа;
- 3) изучить векторные диаграммы последовательной RC-цепи;
- 4) проверить правила вычисления эквивалентной емкости при параллельном и последовательном соединении элементов.

Объекты исследования: RC-цепи с различными значениями емкости.

Домашнее задание

1. Рассчитайте значение частоты гармонического колебания f_0 , при которой модуль реактивного сопротивления конденсатора C_1 равен сопротивлению R_6 .²
2. Для цепи из последовательно соединенных резистора R_6 и конденсатора C_1 рассчитайте амплитуды и начальные фазы напряжений на элементах цепи при подаче на ее вход гармонического напряжения с частотой f_0 , амплитудой 1 В и нулевой начальной фазой. Рассчитайте действительные и мнимые части напряжений на элементах. Результаты расчета сведите в табл. 5, в колонку «Расчет». Постройте векторную диаграмму напряжений в исследуемой цепи.
3. Повторите расчеты и построение векторной диаграммы по п. 2 для значений емкости конденсатора $2C_1$ и $C_1/2$.

² Номинальные значения параметров элементов цепи приведены в описании универсального лабораторного стенда «Лоцман».

Таблица 5

C	Параметры сигналов		Расчет		Измерение 1		Измерение 2	
C_1	$ \dot{U}_C , B$	$\varphi_C, ^\circ$						
	$Re\dot{U}_C, B$	$Im\dot{U}_C, B$			–	–		
	$ \dot{U}_R , B$	$\varphi_R, ^\circ$						
	$Re\dot{U}_R, B$	$Im\dot{U}_R, B$			–	–		
$2C_1$	$ \dot{U}_C , B$	$\varphi_C, ^\circ$						
	$Re\dot{U}_C, B$	$Im\dot{U}_C, B$			–	–		
	$ \dot{U}_R , B$	$\varphi_R, ^\circ$						
	$Re\dot{U}_R, B$	$Im\dot{U}_R, B$			–	–		
$C_1/2$	$ \dot{U}_C , B$	$\varphi_C, ^\circ$						
	$Re\dot{U}_C, B$	$Im\dot{U}_C, B$			–	–		
	$ \dot{U}_R , B$	$\varphi_R, ^\circ$						
	$Re\dot{U}_R, B$	$Im\dot{U}_R, B$			–	–		

Лабораторное задание

1. Подготовьте установку к работе. Для этого подключите к лабораторному стенду генераторный выход цифрового осциллографа к гнездам G_1 , а также второй измерительный канал осциллографа к гнездам P_1 . Первый измерительный канал осциллографа подключите к его генераторному выходу.

2. Соберите цепь из последовательно соединенных источника гармонического напряжения G_1 , резистора R_6 и конденсатора C_1 . Подключите осциллограф P_1 параллельно конденсатору. Питание лабораторного стенда включать не следует.

Установите рассчитанное при домашней подготовке значение частоты гармонического колебания f_0 и амплитуду $1 B^3$. Получите на экране осциллографа устойчивые изображения входного сигнала и напряжения на конденсаторе. Рекомендуется включить режим усреднения осциллограмм (кнопка **ACQUIRE**, режим Average 16).

Выведите на экран (кнопка **MEASURE**) результаты автоматического измерения удвоенной амплитуды (Pk-Pk) сигналов первого и второго канала, а

³ См. п. 3.1 на стр. 6 «Инструкции для работы с цифровым осциллографом Hantek DSO4072C».

также задержку нарастающего фронта канала 2 относительно канала 1 (Delay1-2 Rise)⁴.

3. Измерьте амплитуду напряжения на конденсаторе, а также временной сдвиг выходного сигнала относительно входного. Рассчитайте значение фазового сдвига выходного сигнала относительно входного. Результаты измерений занесите в таблицу 5, в колонки «Измерение 1». Сохраните осциллограмму входного и выходного сигналов на внешнюю флеш-память в формате «.csv» (кнопка **SAVE**)⁵.

Поменяйте местами резистор и конденсатор и повторите измерения параметров выходного напряжения. Результаты измерений занесите в таблицу 5, в колонки «Измерение 1». Сохраните осциллограмму выходного сигнала на внешнюю флеш-память в формате «.csv».

4. Откройте в математическом пакете MathCad файл «Results_2.xmcd». Загрузите сохраненные в п. 3 осциллограммы и проанализируйте полученные результаты. Занесите амплитуды и начальные фазы напряжений, измеренные по сохраненным осциллограммам в режиме трассировки в колонку «Измерение 2» таблицы 5. Сопоставьте с результатами домашнего расчета и автоматических измерений.

5. На той же частоте повторите измерения и анализ результатов пп. 3-4 для двух аналогичных цепей, содержащих вместо одного конденсатора C_1 пару конденсаторов C_1 и C_2 , соединенных: а) параллельно, б) последовательно

б. Сделайте выводы по проделанной работе.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) схемы исследованных цепей;
- 2) таблицу результатов домашних расчетов и измерений в лаборатории;
- 3) расчетные и измеренные векторные диаграммы напряжений;
- 4) сравнение результатов домашних расчетов с результатами измерений.

⁴ См. п. 2.2 на стр. 4 «Инструкции для работы с цифровым осциллографом Hantek DSO4072C».

⁵ См. п. 2.4 на стр. 5 «Инструкции для работы с цифровым осциллографом Hantek DSO4072C».

Контрольные вопросы

1. Изобразите векторную диаграмму напряжений и тока в последовательной RC -цепи, подключенной к источнику гармонического напряжения, для случая, когда модуль реактивного сопротивления конденсатора равен сопротивлению резистора.
2. Как изменится векторная диаграмма, построенная в п. 1 при увеличении частоты генератора в 2 раза?
3. Для указанного в 1-м вопросе режима цепи изобразите осциллограммы входного напряжения, напряжения на конденсаторе и напряжения на резисторе.
4. Как изменится осциллограмма, построенная в п. 3, при увеличении (уменьшении) частоты генератора в 2 раза?
5. Напряжения на элементах последовательной RC -цепи равны 1 В. Как изменятся эти напряжения, если сопротивление резистора увеличить вдвое?
6. Комплексная амплитуда напряжения на входе последовательной RC -цепи равна 10 В, а амплитуда напряжения на конденсаторе 8 В. Чему равна комплексная амплитуда напряжения на резисторе?
7. Частота равна 50 кГц, амплитуда напряжения на входе последовательной RC -цепи равна 10 В, а на резисторе – 6 В. Чему равна постоянная времени цепи?
8. Для питания низковольтного паяльника от сети 220 В используется последовательно включенный конденсатор. Определите требуемую емкость этого конденсатора, если номинальное напряжение паяльника 36 В, а его чисто активное сопротивление 25 Ом.
9. Как будет меняться разность фаз между напряжением на входе последовательной RC -цепи и напряжением на конденсаторе при изменении сопротивления резистора от 0 до $1/(\omega C)$?
10. Изложите примененный Вами метод измерения разности фаз гармонических напряжений с помощью осциллографа.
11. Как с помощью осциллографа измерить комплексную амплитуду гармонического напряжения?
12. Чему равна разность фаз гармонических напряжений на элементах последовательной RC -цепи? Почему и как она зависит от частоты гармонических колебаний?

Лабораторная работа № 3

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ RC-ЦЕПЕЙ

Цель работы:

- 1) получить практические навыки экспериментального исследования амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик линейных цепей;
- 2) изучить частотные характеристики (АЧХ и ФЧХ) последовательных RC-цепей и нерезонансной цепи второго порядка.

Объекты исследования: последовательные RC-цепи (рис. 3 и 4), фильтр Вина (рис. 5).

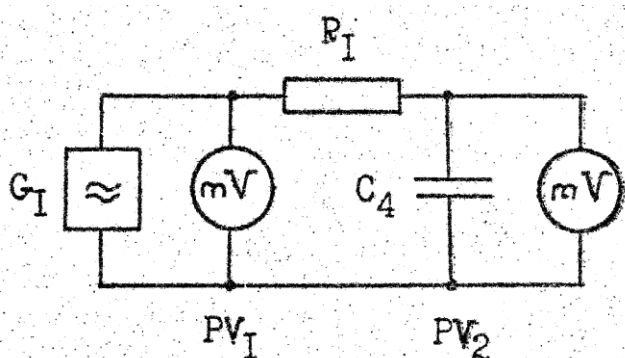


Рис. 3

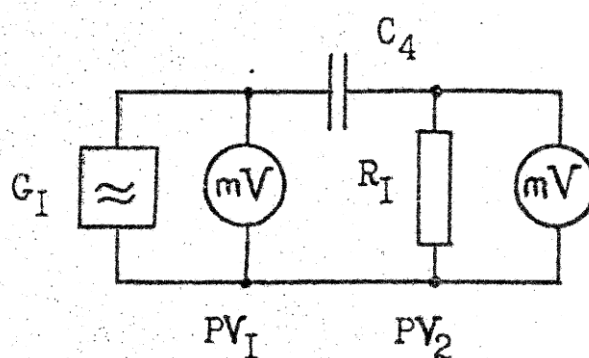


Рис. 4

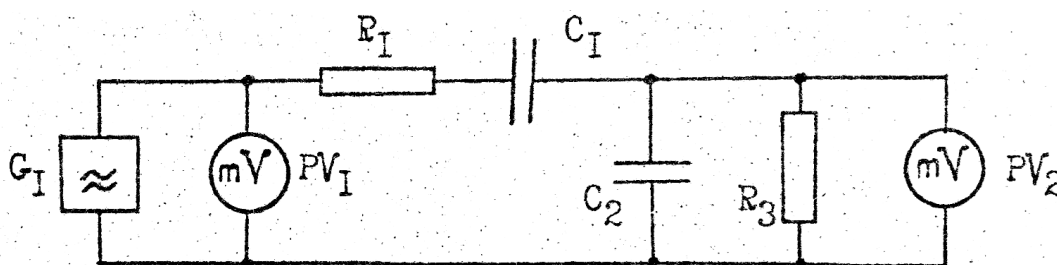


Рис. 5

Домашнее задание

1. Рассчитайте частоту среза исследуемых цепей (рис. 3 и 4) по формуле $f_c = 1/(2\pi R_1 C_4)$.
2. Рассчитайте и постройте амплитудно-частотные и фазо-частотные характеристики исследуемых цепей в диапазоне частот от 0 до $5 f_c$.
3. Выпишите выражения для амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристик фильтра Вина (рис. 5). Найдите значение частоты f_0 , при которой аргумент коэффициента передачи равен нулю.

4. Рассчитайте и постройте АЧХ и ФЧХ фильтра Вина в диапазоне частот от 0 до $5 f_c$.

Лабораторное задание

1. Подготовьте аппаратуру к работе. Для этого подключите к лабораторному стенду генераторный выход осциллографа (к гнездам G_1), и два канала осциллографа (к гнездам PV_1 и PV_2) и включите их. Установите необходимый режим работы генератора – гармонический сигнал, амплитуда – 1 В, частота 1 кГц. Питание стенда включать не следует.

Включите режим усреднения осциллограмм (кнопка **ACQUIRE**, режим Average 16).

2. Соберите первую из исследуемых цепей (рис. 3).

3. Снимите по точкам АЧХ и ФЧХ цепи в диапазоне частот, для которого был проведен домашний расчет. При этом амплитудное значение напряжения генератора поддерживайте постоянным (1 В).

Для измерения АЧХ выведите на экран осциллографа автоматически определяемые параметры Pk-Pk для двух каналов (кнопка **MEASURE**).

Для измерения ФЧХ – параметр (Delay1-2 Rise) – задержку нарастающего фронта канала 2 относительно канала 1⁶.

Установленные значения частоты, измеренные значения амплитуд и временных сдвигов⁷ заносите в таблицу файла Results_3.xmcd математического пакета MathCad. Проведите сравнение экспериментальных зависимостей и теоретических.

4. Повторите исследования п. 3 для другой RC-цепи (рис. 4).

5. Повторите исследования п. 3 для фильтра Вина (рис. 5).

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) схемы исследованных цепей;
- 2) расчетные формулы для АЧХ и ФЧХ исследованных цепей;
- 3) расчетные и экспериментальные АЧХ и ФЧХ исследованных цепей;
- 4) сравнение результатов расчетов с результатами измерений.

⁶ При необходимости уточняйте данное значение в режиме курсорных измерений.

⁷ Опережение или отставание выходного сигнала относительно входного учтите правильным выбором знака («+» или «-») временного смещения.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение АЧХ и ФЧХ электрической цепи. Выведите выражения для АЧХ и ФЧХ фильтра верхних частот на базе последовательной RC -цепи.
2. Как зависят АЧХ и ФЧХ фильтров на базе последовательной RC -цепи от емкости конденсатора?
3. Найдите АЧХ цепей, изображенных на рис. 6 и 7.

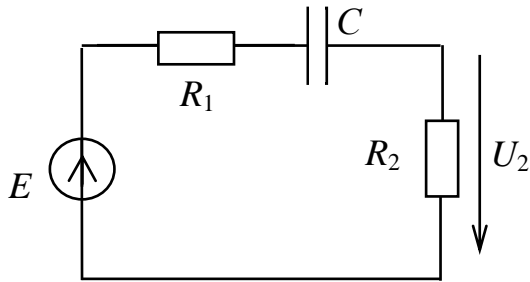


Рис. 6

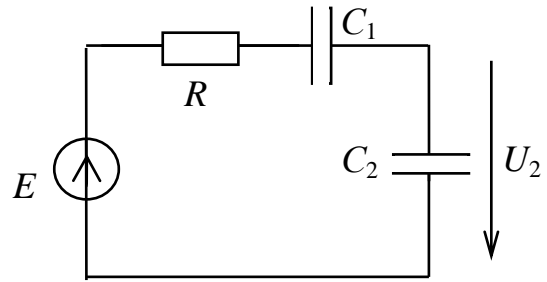


Рис. 7

4. Для заданной частоты генератора постройте зависимость амплитуды напряжения на резисторе в схеме рис. 6 от величины емкости конденсатора.
5. Постройте зависимость модуля комплексного коэффициента передачи RC -цепи фильтра нижних частот на фиксированной частоте от величины сопротивления резистора.
6. Постройте зависимость фазы комплексного коэффициента передачи RC -цепи фильтра нижних частот на фиксированной частоте от величины емкости конденсатора.
7. Поясните принцип экспериментального измерения АЧХ цепи.
8. Поясните принцип экспериментального измерения ФЧХ цепи.
10. Как постоянная времени цепи связана с частотой среза фильтров?
11. Выведите выражения для АЧХ и ФЧХ фильтра Вина (рис. 5).
12. Как изменятся АЧХ и ФЧХ фильтра Вина, если емкости конденсаторов увеличить вдвое?

Лабораторная работа № 4

ЧАСТОТНЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОГО КОЛЕБАТЕЛЬНОГО КОНТУРА

Цель работы:

- 1) получить практические навыки экспериментального исследования частотных характеристик резонансных цепей;
- 2) изучить явление последовательного резонанса (резонанса напряжений);
- 3) изучить частотные характеристики последовательного колебательного контура;
- 4) изучить влияние потерь в контуре на его резонансные свойства.

Объекты исследования: последовательные колебательные контуры с различными значениями сопротивления потерь (рис. 8 и 9).

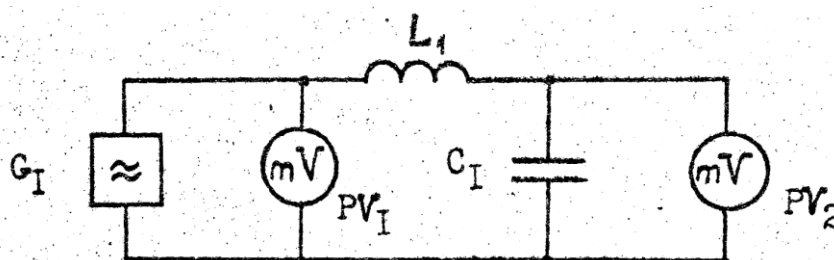


Рис. 8

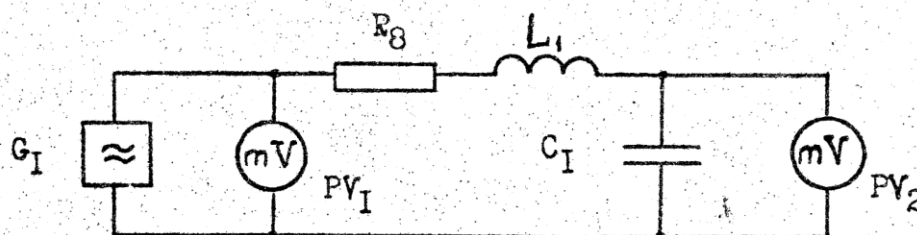


Рис. 9

Домашнее задание

1. Изобразите характер амплитудно-частотной характеристики последовательного колебательного контура (рис. 8 и 9). Обозначьте на рисунке характерные параметры АЧХ: резонансную частоту f_p , коэффициент передачи на резонансной частоте K_{\max} , ширину полосы пропускания $2\Delta\omega_{0.7}$.

2. Для последовательного колебательного контура (рис. 8) рассчитайте параметры контура: резонансную частоту f_p , характеристическое сопротивление ρ , суммарное сопротивление потерь r , сопротивление потерь катушки индуктивности r_L , коэффициент передачи на резонансной частоте K_{\max} , ширину полосы пропускания $2\Delta f_{0.7}$. При расчете примите значение выходного сопротивления генератора r_g равным 5 Ом, а значение добротности контура Q (с учетом выходного сопротивления генератора) равным соответствующему значению из табл. 6.

Таблица 6

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
Q	80	70	75	60	55	50	65	60

3. Повторите расчеты указанных в п. 2 параметров для контура с дополнительным резистором (рис. 2).

4. Сравните рассчитанные параметры контура с дополнительным резистором с соответствующими параметрами исходного контура. Для этого результаты всех расчетов сведите в таблицу (в таблице предусмотрите место для результатов измерений).

Лабораторное задание

1. Подготовьте аппаратуру к работе. Для этого подключите к лабораторному стенду генераторный выход осциллографа (к гнездам G_1), и два канала осциллографа (к гнездам PV_1 и PV_2). Питание стенда включать не следует.

Измерьте с помощью мультиметра значение емкости конденсатора C_1 . Уточните значение резонансной частоты f_p , рассчитанной в домашней подготовке.

Установите необходимый режим работы генератора – гармонический сигнал, амплитуда – 0,1 В, частота – f_p .

Включите режим усреднения осциллограмм (кнопка **ACQUIRE**, режим Average 16).

2. Соберите последовательный колебательный контур (рис. 8) и снимите по точкам его АЧХ и ФЧХ в области резонанса. Измерения проводите в диапазоне частот, где $K(f) > K_{\max}/4$ (особенно тщательно вблизи резонансной частоты и вблизи границ полосы пропускания).

Для измерения АЧХ выведите на экран осциллографа автоматически определяемые параметры Pk-Pk для двух каналов (кнопка **MEASURE**).

Для измерения ФЧХ – параметр (Delay1-2 Rise) – задержку нарастающего фронта канала 2 относительно канала 1⁸.

Установленные значения частоты, измеренные значения амплитуд и временных сдвигов⁹ заносите в таблицу файла Results_4.xmcd математического пакета MathCad. Проведите сравнение экспериментальных зависимостей и теоретических. Для этого уточните значение емкости конденсатора с помощью мультиметра. Варьируйте значение индуктивности катушки до максимального совпадения теоретических и экспериментальных зависимостей.

По экспериментальной АЧХ определите ее характерные параметры f_p , K_{\max} , $2\Delta f_{0.7}$, а также добротность Q (по измеренным параметрам f_p и $2\Delta f_{0.7}$), суммарное сопротивление потерь r (по известным значениям ρ и Q) и сопротивление потерь катушки индуктивности r_L .

3. Включите в колебательный контур дополнительный резистор (рис. 9) и повторите исследования п. 2 для этого случая.

4. Сравните экспериментальные АЧХ последовательных колебательных контуров с различными значениями сопротивления потерь, для чего постройте обе АЧХ на одном графике. Измеренные параметры обоих контуров сравните между собой и с расчетными параметрами, для чего сведите их в таблицу, составленную при выполнении п. 4 домашнего задания.

Содержание отчета

Отчет должен содержать:

- 1) схемы исследованных контуров;
- 2) необходимые расчетные формулы;
- 3) таблицу расчетных и измеренных параметров;
- 4) графики экспериментальных и теоретических АЧХ и ФЧХ;
- 5) сравнение результатов расчетов с результатами измерений;
- 6) выводы о влиянии потерь в контуре на его резонансные свойства.

⁸ При необходимости уточняйте данное значение в режиме курсорных измерений.

⁹ опережение или отставание выходного сигнала относительно входного учитите правильным выбором знака («+» или «-») временного смещения.

Контрольные вопросы

1. В чем состоит явление последовательного резонанса (резонанса напряжений)?
2. Изобразите векторную диаграмму напряжений и тока в последовательном колебательном контуре на частоте его резонанса.
3. Как выглядит зависимость амплитуды тока в последовательном колебательном контуре от частоты при неизменной амплитуде входного напряжения?
4. Как изменится разность фаз между током в контуре и входным напряжением при изменении частоты входного напряжения?
5. Изобразите векторную диаграмму напряжений и тока в последовательном колебательном контуре при частоте, соответствующей границе полосы пропускания.
6. Изобразите характер АЧХ последовательного колебательного контура, если выходным напряжением является: а) напряжение на конденсаторе; б) напряжение на катушке индуктивности.
7. Что такое полоса пропускания контура? Как ее измерить?
8. Каким образом можно экспериментально определить добротность последовательного колебательного контура? Его сопротивление потерь?
9. Частота источника напряжения задана. Как будет изменяться ток в последовательном резонансном контуре при изменении емкости конденсатора?
10. Как изменится зависимость тока в последовательном резонансном контуре от частоты, если величину индуктивности увеличить в два раза, а номинал конденсатора уменьшить в два раза?
11. Как изменится зависимость тока в последовательном резонансном контуре от частоты, если величину емкости увеличить в два раза, а номинал катушки индуктивности уменьшить в два раза?

Лабораторная работа № 5

СВОБОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы:

- 1) получить практические навыки экспериментального исследования свободных колебаний в линейных электрических цепях;
- 2) исследовать свободные колебания в линейных цепях первого и второго порядков.

Объекты исследования: последовательная RC -цепь, последовательный колебательный контур.

Домашнее задание

1. Выпишите аналитические выражения изменения напряжения на конденсаторе C_3 в ходе свободного процесса его разрядки через резистор R_1 .
2. Постройте график изменения напряжения на конденсаторе, первоначально заряженном до напряжения $U_0 = 4$ В. Рассчитайте и отметьте на графике постоянную времени цепи τ и время установления $t_{уст}$.
3. Выпишите аналитические выражения изменения напряжения на конденсаторе C_1 в ходе свободного процесса его разрядки через последовательное соединение резистора R_8 и катушки индуктивности L_1 .
4. Постройте график изменения напряжения на конденсаторе, первоначально заряженном до напряжения $U_0 = 4$ В. Рассчитайте и отметьте на графике постоянную времени цепи τ , время установления $t_{уст}$. Рассчитайте значения коэффициента затухания α и частоты собственных колебаний ω_c .

Лабораторное задание

1. Подготовка стенда к работе

Подключите к гнездам G_1 лабораторного стенда генераторный выход осциллографа, а к гнездам P_1 – второй канал осциллографа. Первый канал осциллографа подключите непосредственно к генераторному выходу осциллографа. Включите осциллограф.

2. Изучение свободных процессов в RC -цепи

2.1. Соберите цепь, состоящую из последовательного соединения генератора G_1 , резистора R_1 и конденсатора C_3 . Подключите к конденсатору измерительный вход осциллографа (P_1).

2.2. Подайте на вход цепи последовательность прямоугольных импульсов (**Square**) с частотой следования $f = 1$ кГц, величина напряжения которых изменяется в пределах от 0 до 4 В.

2.3. Наблюдайте на экране осциллографа входной и выходной сигналы, соответствующие спаду прямоугольного импульса – процессу разрядки конденсатора. Разместите на экране осциллограммы таким образом, чтобы нулевые уровни входного и выходного сигналов соответствовали нулевому уровню (центральной горизонтальной линии) экрана осциллографа.

2.4. Сохраните осциллограммы в формате «.csv». Для этого воспользуйтесь либо флеш-памятью и меню осциллографа **Save**, либо программой TTScore (соответствующая иконка расположена на рабочем столе компьютера).

В последнем случае необходимо после запуска программы в окне Wave получить изображение осциллограмм, нажав на иконку со стрелкой (Play). Затем, нажав на первую иконку в верхней панели меню, создать новый документ, выбрать **Waveform Tabular**, появится окно с данными Data. Чтобы в окне Data появились данные, нужно в этом окне также нажать на Play. Для сохранения числовых данных воспользуйтесь пунктами меню **File/Export/Сохранить как** (выбрать формат «.csv»). После сохранения данных первого и второго каналов осциллографа необходимо закрыть программу TTScore (если этого не сделать, то в скором времени отключится экран осциллографа).

2.5. Создайте на рабочем столе папку с названием «Results_1_N», где N – номер вашей бригады. Поместите в эту папку записанные сигналы с осциллографа, а также скопируйте с рабочего стола файл отчета заготовки «Results_1.xmcd».

2.6. Загрузите сохраненные сигналы в файл «Results_1.xmcd». По графикам измеренной зависимости $u_C(t)$ в режиме трассировки определите постоянную времени цепи τ и время установления $t_{уст}$. Сравните измеренные значения с результатами домашнего расчета. Сопоставьте сохраненные сигналы с теоретическими графиками.

2.7. Поменяйте конденсатор C_3 на C_1 . Повторите исследования пп. 2.4-2.6 для измененной цепи. Сделайте выводы о характере свободного процесса и влиянии параметров цепи на скорость изменения напряжения на конденсаторе.

3. Изучение свободных процессов в колебательном контуре

3.1. Соберите цепь, состоящую из последовательного соединения генератора G_1 , катушки индуктивности L_1 и конденсатора C_1 . Подключите к конденсатору измерительный вход осциллографа (P_1).

3.2. Наблюдайте на экране осциллографа собственные колебания в колебательном контуре в процессе разрядки конденсатора, установив удобный для наблюдения масштаб. Сохраните осциллограммы в формате «.csv».

3.3. Загрузите сохраненные сигналы в файл «Results_1.xmcd». По графикам в режиме трассировки определите постоянную времени цепи τ , время установления $t_{уст}$ и период собственных колебаний T_c . Рассчитайте по найденным значениям коэффициент затухания α и частоту собственных колебаний ω_c .

Определите сопротивление потерь катушки индуктивности r_L .

3.4. Добавьте в схему резистор R_8 . Повторите исследования пп. 3.2 и 3.3.

Сравните найденные параметры свободных колебаний с рассчитанными в п. 4 домашней подготовки. Сопоставьте сохраненные зависимости с теоретическими графиками. Сделайте выводы о влиянии потерь в колебательном контуре на скорость затухания свободных колебаний.

4. Оформление отчета

Оформите отчет по проделанной работе в электронном виде и сдайте преподавателю. Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) осциллограммы свободных процессов (теоретические и практические);
- 4) расчетные и экспериментально определенные значения параметров свободных процессов;
- 5) выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте законы коммутации.
2. Каким элементом при определении начальных условий сразу после коммутации можно заменить конденсатор? Катушку индуктивности?
3. Дайте определение постоянной времени RC -цепи. Как ее можно определить по графику свободных процессов? Рассчитать через параметры цепи?
4. Как связаны между собой время установления и постоянная времени RC -цепи?
5. Как влияют параметры RC -цепи на скорость свободных процессов?
6. Какие параметры одиночного колебательного контура можно определить по осциллограмме свободных колебаний? Как это сделать?

7. Какими параметрами колебательного контура определяются частота свободных колебаний? Скорость затухания свободных колебаний?

8. Как связан коэффициент затухания свободных процессов в колебательном контуре с его добротностью?

9. Как влияют резистивные потери колебательного контура на характер свободных процессов? На частоту собственных колебаний?

Лабораторная работа № 6

ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

Цель работы:

- 1) получить практические навыки экспериментального исследования переходных процессов в линейных электрических цепях;
- 2) исследовать переходные процессы в линейных цепях первого и второго порядков;
- 3) изучить переходные характеристики указанных цепей.

Объекты исследования: последовательная RC -цепь, фильтр Вина (рис. 10), последовательный колебательный контур.

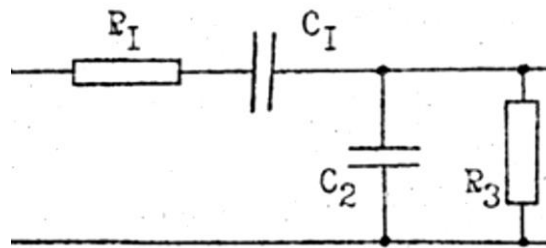


Рис. 10

Домашнее задание

1. Выпишите аналитические выражения для переходных характеристик RC -цепи. Рассмотрите два варианта выходного сигнала – напряжение на конденсаторе и напряжение на резисторе.
2. Постройте графики переходных характеристик, если RC -цепь состоит из резистора R_1 и конденсатора C_4 . Рассчитайте постоянную времени цепи, обозначьте ее графиках.
3. Выпишите аналитическое выражение для переходной характеристики фильтра Вина (рис. 10). Определите момент времени, соответствующий максимуму переходной характеристики.
4. Постройте график переходной характеристики фильтра Вина.
5. Выпишите аналитическое выражение для переходной характеристики последовательного колебательного контура, состоящего из элементов C_1 , L_1 и R_8 (выходной сигнал - напряжение на конденсаторе C_1).
6. Постройте графики переходных характеристик колебательного контура. Рассмотрите два варианта – с резистором R_8 и без него. Рассчитайте период

собственных колебаний T_c и постоянную времени цепи τ . Обозначьте эти величины на графиках.

Лабораторное задание

1. Подготовка стенда к работе

Подключите к гнездам G_1 лабораторного стенда генераторный выход осциллографа, а к гнездам P_1 – второй канал осциллографа. Первый канал осциллографа подключите непосредственно к генераторному выходу осциллографа. Включите осциллограф.

2. Изучение переходных процессов в RC-цепи

2.1. Соберите цепь, состоящую из последовательного соединения генератора G_1 , резистора R_1 и конденсатора C_4 . Подключите к конденсатору измерительный вход осциллографа (P_1).

2.2. Подайте на вход цепи последовательность прямоугольных импульсов (**Square**) с частотой следования $f = 1$ кГц, величина напряжения которых изменится в пределах от 0 до 4 В.

2.3. Наблюдайте на экране осциллографа передний фронт прямоугольного импульса и переходной процесс. Разместите на экране осциллограммы таким образом, чтобы нулевые уровни входного и выходного сигналов соответствовали нулевому уровню (центральной горизонтальной линии) экрана осциллографа.

2.4. Сохраните осциллограммы в формате «.csv». Для этого воспользуйтесь либо флеш-памятью и меню осциллографа **Save**, либо программой TTScope.

2.5. Создайте на рабочем столе папку с названием «Results_2_N», где N – номер вашей бригады. Поместите в эту папку записанные сигналы с осциллографа, а также скопируйте с рабочего стола файл заготовки отчета «Results_2.xmcd».

2.6. Загрузите сохраненные сигналы в файл «Results_2.xmcd». По графикам измеренной зависимости $u_C(t)$ в режиме трассировки определите постоянную времени цепи τ . Сравните измеренные значения с результатами домашнего расчета. Сопоставьте сохраненные зависимости с теоретическими графиками.

2.7. Поменяйте местами резистор и конденсатор. Повторите исследования пп. 2.3 и 2.6 для измененной цепи.

2.8. Проанализируйте полученные результаты: объясните вид переходных характеристик ФНЧ и ФВЧ с точки зрения поведения реактивных элементов при коммутации (включении импульса) и по окончании переходных процессов (в установившемся режиме).

3. Изучение переходных процессов в фильтре Вина

3.1. Соберите цепь, представленную на рис. 1. Подключите к резистору R_3 измерительный вход осциллографа (P_1).

3.2. Наблюдайте на экране осциллографа передний фронт прямоугольного импульса и переходной процесс. Сохраните осциллограммы в формате «.csv».

3.3. Загрузите сохраненные сигналы в файл «Results_2.xmcd» и сопоставьте с графиками переходной характеристики фильтра Вина. Определите в режиме трассировки время максимального значения переходной характеристики, сопоставьте его с теоретически рассчитанным значением.

3.4. Проанализируйте полученные результаты: объясните вид переходной характеристики полосового фильтра с точки зрения поведения реактивных элементов при коммутации (включении импульса) и по окончании переходных процессов.

4. Изучение переходных процессов в колебательном контуре

4.1. Соберите цепь, состоящую из последовательного соединения генератора G_1 , катушки индуктивности L_1 и конденсатора C_1 . Подключите к конденсатору измерительный вход осциллографа (P_1).

4.2. Наблюдайте на экране осциллографа передний фронт прямоугольного импульса и переходной процесс. Сохраните осциллограммы в формате «.csv».

4.3. Загрузите сохраненные сигналы в файл «Results_2.xmcd». По графикам в режиме трассировки определите постоянную времени цепи τ и период собственных колебаний T_c . Рассчитайте по найденным значениям коэффициент затухания α и частоту собственных колебаний ω_c .

Определите сопротивление потерь катушки индуктивности r_L .

4.4. Добавьте в схему резистор R_8 . Повторите исследования пп. 4.2 и 4.3.

4.5. Сравните найденные параметры свободных колебаний с рассчитанными в домашней подготовке. Сопоставьте сохраненные зависимости с теоретическими графиками переходных характеристик.

4.6. Проанализируйте полученные результаты: объясните вид переходной характеристики колебательного контура с точки зрения поведения реактивных элементов при коммутации (включении импульса) и по окончании переходных процессов.

5. Оформление отчета

Оформите отчет по проделанной работе в электронном виде и сдайте преподавателю. Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) осциллограммы переходных процессов, совмещенные с теоретическими переходными характеристиками;
- 4) расчетные и экспериментально определенные значения параметров переходных процессов;
- 5) анализ полученных результатов.

Контрольные вопросы

1. Дайте определение импульсной и переходной характеристик линейной цепи.
2. Выведите аналитические выражения для импульсных и переходных характеристик исследованных цепей.
3. Как, зная переходную характеристику цепи, рассчитать реакцию этой цепи на прямоугольный импульс?
4. Как связаны импульсная и переходная характеристики цепи между собой? С комплексной передаточной функцией цепи? С операторной передаточной функцией цепи?
5. В чем заключается качественное отличие свободных колебаний и переходных процессов в колебательной цепи (второго порядка) от соответствующих процессов в апериодической цепи?
6. Как изменятся переходные процессы в колебательном контуре, если увеличить вдвое сопротивление потерь? Уменьшить вдвое емкость конденсатора?
7. Наблюдались ли в работе расхождения измеренных параметров с расчетными? Если да, то укажите наиболее вероятную причину (причины) расхождений.

Лабораторная работа № 7
ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ПРИ ИМПУЛЬСНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЯХ

Цель работы:

- 1) получить практические навыки экспериментального исследования прохождения сигналов различной формы через линейные цепи;
- 2) изучить особенности изменения формы импульсных сигналов при их прохождении через ФНЧ, ФВЧ и полосовой фильтр.

Объекты исследования: последовательная RC -цепь, фильтр Вина (рис. 11).

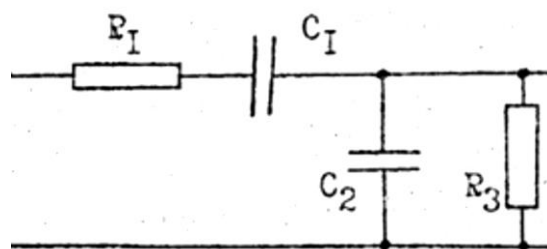


Рис. 11

Домашнее задание

1. Аналитически опишите импульсные сигналы, представленные на рис. 12 и 13.

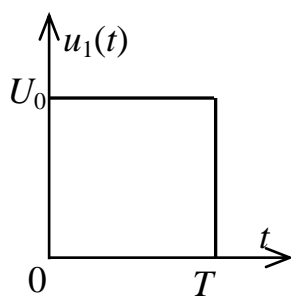


Рис. 12

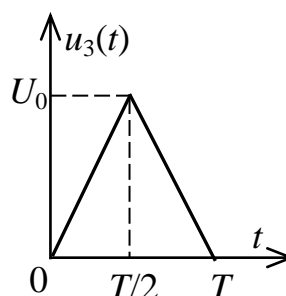


Рис. 13

2. Выпишите аналитические выражения для реакции исследуемых цепей на импульсные сигналы рис. 12 и 13.
3. Изобразите сигналы на выходе ФНЧ (RC -цепи, выходной сигнал – напряжение на конденсаторе) при действии на ее входе импульсов, описанных в п. 1, в случаях, когда $T \gg \tau$ и $T \ll \tau$, где τ – постоянная времени RC -цепи.
4. Для тех же случаев изобразите сигналы на выходе ФВЧ (RC -цепи, выходной сигнал – напряжение на резисторе).

5. Изобразите сигналы на выходе фильтра Вина при действии на его входе импульсов, описанных в п. 1, если длительность импульсов $T = 1/f_0 = 1/(R_1C_1)$, где f_0 – частота, соответствующая максимуму АЧХ фильтра Вина.

Лабораторное задание

1. Подготовка стенда к работе

Подключите к гнездам G_1 лабораторного стенда генераторный выход осциллографа, а к гнездам P_1 – второй канал осциллографа. Первый канал осциллографа подключите непосредственно к генераторному выходу осциллографа. Включите осциллограф.

2. Изучение прохождения импульсных сигналов через фильтр нижних частот

2.1. Соберите цепь, состоящую из последовательного соединения генератора G_1 , резистора R_1 и конденсатора C_4 . Подключите к конденсатору измерительный вход осциллографа (P_1).

2.2. Подайте на вход цепи последовательность прямоугольных импульсов (**Square**) с частотой следования $f \approx 3/\tau$ (частоту округлите до целого числа кГц), величина напряжения которых изменяется в пределах от 0 до 2 В.

2.3. Наблюдайте на экране осциллографа 1-2 периода входного и выходного сигналов.

2.4. Сохраните осциллограммы в формате «.csv». Для этого воспользуйтесь либо флеш-памятью и меню осциллографа **Save**, либо программой TTScope.

2.5. Создайте на рабочем столе папку с названием «Results_3_N», где N – номер вашей бригады. Поместите в эту папку записанные сигналы с осциллографа, а также скопируйте с рабочего стола файл заготовки отчета «Results_3.xmcd».

2.6. Загрузите сохраненные сигналы в файл «Results_3.xmcd». Сопоставьте сохраненные зависимости с теоретическими графиками из домашней подготовки.

2.7. Измените тип входного сигнала на последовательность треугольных импульсов (**Ramp**) с той же частотой. Повторите исследования пп. 2.3-2.6.

2.8. Повторите пп. 2.2-2.7 при частоте входного воздействия $f \approx 1/(30\tau)$ (частоту округлите до целого числа Гц).

2.9. Проанализируйте полученные осциллограммы входных и выходных сигналов, сделайте вывод об интегрирующих свойствах фильтра нижних частот и об условиях, в которых они проявляются.

3. Изучение прохождения импульсных сигналов через фильтр верхних частот

3.1. Поменяйте местами резистор и конденсатор.

3.2. Повторите исследования пп. 2.2-2.8.

3.3. Проанализируйте полученные осциллограммы входных и выходных сигналов, сделайте вывод о дифференцирующих свойствах фильтра верхних частот и об условиях, в которых они проявляются.

4. Изучение прохождения импульсных сигналов через полосовой фильтр

4.1. Соберите фильтр Вина (рис. 2). Подключите к резистору R_3 измерительный вход осциллографа (P_1).

4.2. Подайте на вход фильтра Вина последовательность прямоугольных импульсов с частотой следования $f_0 \approx 1/(10R_1C_1)$ (частоту округлите до целого числа кГц), остальные параметры – такие же как в пп. 2 и 3.

4.3. Наблюдайте на экране осциллографа 1-2 периода входного и выходного сигналов.

4.4. Сохраните осциллограммы в формате «.csv».

4.5. Загрузите сохраненные сигналы в файл «Results_3.xmcd». Сопоставьте сохраненные зависимости с теоретическими графиками из домашней подготовки.

4.6. Измените тип входного сигнала на последовательность треугольных импульсов с той же частотой. Повторите исследования пп. 4.3-4.5.

4.7. Проанализируйте полученные осциллограммы входных и выходных сигналов, сделайте вывод о характерных искажениях формы сигналов при прохождении через полосовой фильтр: какие изменения вносит фильтр на низких частотах, какие – на высоких.

5. Оформление отчета

Оформите отчет по проделанной работе в электронном виде и сдайте преподавателю. Отчет должен содержать:

1) титульный лист;

- 2) цель работы;
- 3) осциллограммы входных и выходных сигналов исследуемых цепей;
- 4) анализ осциллограмм;
- 5) выводы по проделанной работе.

Контрольные вопросы

1. Какие характерные изменения импульсных сигналов появляются при прохождении через фильтр нижних частот? Верхних частот? Полосовой фильтр?

2. При каком соотношении длительности импульса и постоянной времени цепи проявляются интегрирующие свойства RC -цепи? Каким типом фильтра при этом является RC -цепь?

3. При каком соотношении длительности импульса и постоянной времени цепи проявляются дифференцирующие свойства RC -цепи? Каким типом фильтра при этом является RC -цепь?

Лабораторная работа № 8

СТАЦИОНАРНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНИИ ПЕРЕДАЧИ

Цель работы:

- 1) экспериментальное изучение распространения электромагнитных колебаний вдоль линии передачи;
- 2) ознакомление с методикой измерения комплексных сопротивлений двухполюсников, на которые нагружена линия.

Объекты исследования: эксперименты проводятся на цепочечном эквиваленте линии, образованном из 20 ячеек П-образных фильтров нижних частот (рис. 14).

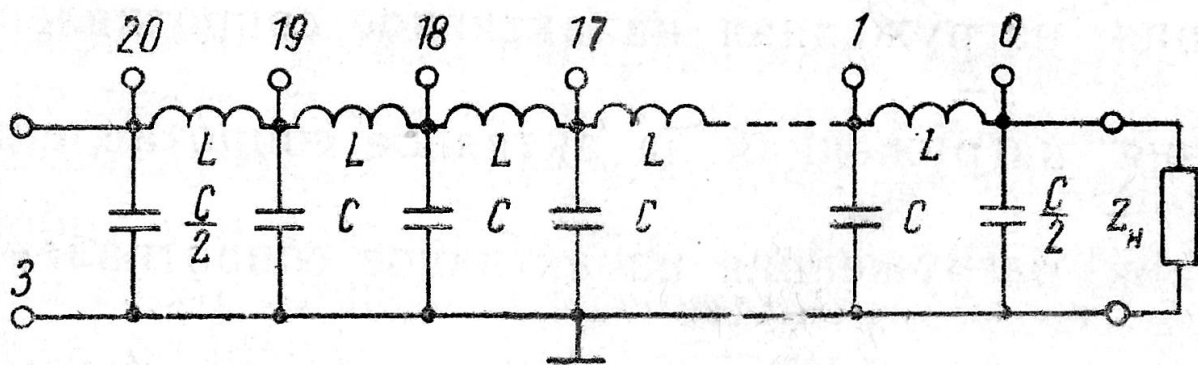


Рис. 14

На вход линии (зажимы 20-3) подается напряжение от генератора, к выходным зажимам 0-3 подключается нагрузка. С помощью осциллографа проводится наблюдение и измерение амплитуды напряжения на каждой из 20 ячеек и затем строится распределение напряжения вдоль линии.

Домашнее задание

1. Для заданных значений L , C и f определите волновое сопротивление Z_B цепочечного эквивалента и фазовый сдвиг одной ячейки по формуле $\beta_1 = -\arctg(\omega\sqrt{LC})$ на частотах $f = 16$ кГц $0.7f$, и $1.3f$. Значения L и C приведены в табл. 7.

Таблица 7

№ бригады	1	2	3	4	5	6	7	8
C_n , нФ	2,7	3,0	3,0	3,0	3,0	2,7	3,3	3,3
L_n , мГн	2,8	2,9	2,3	2,7	2,2	2,4	3,1	3,0
C_n , нФ	–	27,3	–	20,5	–	18,9	43,9	19,3
L_n , мГн	19,7	–	10,7	–	11,6	–	–	–
R_n , Ом	590	520	400	420	520	540	210	600
τ_n , мкс	55	63	57	60	55	55	64	65

2. Рассчитайте и постройте кривые распределения напряжения вдоль линии для случаев:

- линия, разомкнутая на конце;
- линия, замкнутая на конце;
- линия, нагруженная на активное сопротивление $R = 150$ Ом;
- линия, нагруженная на комплексное сопротивление ($Z_n = R_n + j\omega L_n$ или $Z_n = R_n + 1/(j\omega C_n)$), значения R_n , L_n и C_n приведены в табл. 2;
- линия, нагруженная на активное сопротивление $R_n = Z_n$.

При построении графиков используйте в качестве переменной номер ячейки цепочечного эквивалента линии.

Лабораторное задание

1. Подготовка стенда к работе

Подключите к цепочечному эквиваленту линии генераторный выход осциллографа (через согласующий резистор с сопротивлением ~ 1000 Ом) и второй измерительный канал осциллографа. Первый канал осциллографа подключите непосредственно к генераторному выходу осциллографа.

Включите осциллограф и установите необходимый режим работы генератора – гармонический сигнал с частотой f и амплитудой 2 В.

Скопируйте файл «Results_4_0.xmcd» на рабочем столе компьютера в файл с названием «Results_4_N.xmcd», где N – номер вашей бригады.

2. Изучение распределения амплитуд напряжения в линии при различных типах нагрузки

2.1. Снимите кривые распределения напряжения вдоль линии для случаев:

- а) линия, разомкнутая на конце;
- б) линия, закороченная на конце;
- в) линия, нагруженная на активное сопротивление $R = 150 \text{ Ом}$.

Экспериментальные точки заносите в таблицу файла «Results_4_N.xmcd».

2.2. Нагрузите линию на комплексное сопротивление Z_n , снимите кривую распределения напряжения вдоль линии. Рассчитайте величину сопротивления нагрузки.

2.3. Нагрузите линию на активное сопротивление $R_n = Z_n$ (подключите на выход линии согласующий резистор со входа; в этом случае на входе он будет не нужен). С помощью осциллографа снимите распределение амплитуд сигнала и фазового сдвига вдоль линии на частотах $0.7f$, f и $1.3f$. Для этого на экране осциллографа получите изображение одного-двух периодов гармонического напряжения с выхода двадцатой ячейки и входного сигнала в том же масштабе.

Для измерения временного сдвига выведите на экран осциллографа автоматически определяемый параметр (Delay1-2 Rise). При необходимости уточните временной сдвиг в режиме курсорных изменений.

При переходе от ячейки к ячейке измеряйте сдвиг изображения по оси времени Δt и заносите в соответствующую таблицу файла «Results_4_N.xmcd».

Результаты эксперимента сопоставьте с расчетом.

3. Оформление отчета

Оформите отчет по проделанной работе в электронном виде и сдайте преподавателю. Отчет должен содержать:

- 1) титульный лист;
- 2) цель работы;
- 3) измеренные и рассчитанные зависимости распределений амплитуд напряжения вдоль линии;
- 4) измеренные и рассчитанные зависимости распределений фаз напряжения вдоль линии в согласованном режиме;
- 5) анализ полученных зависимостей.

Контрольные вопросы

1. Какой физический смысл имеет понятие волнового сопротивления?
2. Изобразите кривые распределения амплитуд напряжения и тока вдоль линии, нагруженной на волновое сопротивление; разомкнутой на конце; закороченной на конце.
3. Изобразите кривые распределения амплитуд напряжения и тока вдоль линии, нагруженной на емкость (индуктивность). Как изменится закон распределения, если емкость (индуктивность) увеличить (уменьшить)? При построении учтите, что на входе линии подключен источник ЭДС с постоянной амплитудой.
4. Рассмотрите предыдущий вопрос в предположении, что линия питается источником тока.
5. Как изменится закон распределения амплитуды напряжения вдоль линии, разомкнутой на конце (закороченной на конце), если уменьшится длина линии?
6. Как изменится закон распределения амплитуды напряжения вдоль линии, нагруженной на волновое сопротивление, если нагрузку зашунтировать малой емкостью C_0 ($Z_B \ll 1/(\omega C_0)$)?
7. Коаксиальная линия имеет заполнение из полиэтилена ($\varepsilon = 2.25$). Как изменится волновое сопротивление линии, если диаметр внешнего проводника увеличить вдвое?
8. Линия с волновым сопротивлением $Z_{B1} = 100$ Ом нагружена на отрезок другой линии с волновым сопротивлением $Z_{B2} = 30$ Ом, последняя согласована на конце. Определить величину коэффициента отражения от скачка волновых сопротивлений.
9. Изобразите характер зависимостей входного сопротивления отрезков короткозамкнутой и разомкнутой линий в зависимости от длин отрезков. Приведите соответствующие расчетные формулы.
10. Изобразите характер зависимостей активной и реактивной составляющей входного сопротивления линии без потерь от частоты (длины линии) при активной нагрузке $R_n \neq Z_B$.
11. Для каждого из вариантов п. 2 лабораторного задания постройте зависимость распределения сдвигов фаз по длине линии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Баскаков С.И. Лекции по теории цепей. – М.: Либроком, 2009. – 280 с.
2. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи с распределенными параметрами. – М.: Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2012. – 152 с.
3. Гречихин В.А. Основы теории цепей. Руководство к решению задач анализа линейных цепей с сосредоточенными параметрами. – М.: Изд. МЭИ, 2002. – 80 с.
4. Гречихин В.А. Основы теории цепей. Руководство к решению задач анализа и синтеза двухполюсников и четырехполюсников. – М.: Издательство МЭИ, 2003. – 84 с.
5. Гречихин В.А., Шалимова Е.В. Основы теории цепей. Методические указания к использованию программного пакета MATCAD при решении задач анализа цепей. – М.: Изд-во МЭИ, 2002. – 48 с.

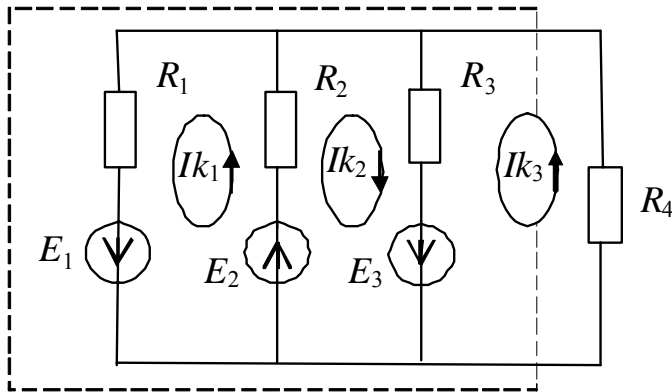
РАЗВЕТВЛЕННАЯ ЦЕПЬ ПОСТОЯННОГО ТОКА

ORIGIN := 1 i := 1..4

Задайте номиналы резисторов исследуемой цепи и значения ЭДС источников:

$$R_1 := 1.0 \cdot 10^3 \text{ [Ом]} \quad R_2 := 2.0 \cdot 10^3 \text{ [Ом]} \quad R_3 := 3.0 \cdot 10^3 \text{ [Ом]} \quad R_4 := 4.0 \cdot 10^3 \text{ [Ом]}$$

$$E_1 := 1 \text{ [В]} \quad E_2 := 2 \text{ [В]} \quad E_3 := 3 \text{ [В]}$$

**1. Расчет****1.1. Расчет токов и напряжений в цепи методом контурных токов**

Матрица сопротивлений:

$$R_K := \begin{pmatrix} R_1 + R_2 & R_2 & 0 \\ R_2 & R_2 + R_3 & R_3 \\ 0 & R_3 & R_3 + R_4 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \times 10^3 & 2 \times 10^3 & 0 \\ 2 \times 10^3 & 5 \times 10^3 & 3 \times 10^3 \\ 0 & 3 \times 10^3 & 7 \times 10^3 \end{pmatrix} \text{ [Ом]}$$

Столбец источников:

$$E_K := \begin{pmatrix} E_1 + E_2 \\ E_2 + E_3 \\ E_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 3 \\ 5 \\ 3 \end{pmatrix} \text{ [В]}$$

Контурные токи:

$$I_K := R_K^{-1} \cdot E_K = \begin{pmatrix} 5.2 \times 10^{-4} \\ 7.2 \times 10^{-4} \\ 1.2 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \text{ [А]}$$

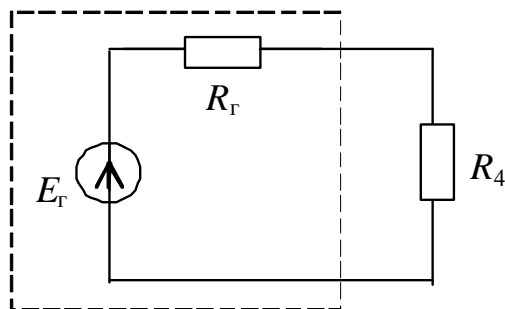
Токи через резисторы:

$$I := \begin{pmatrix} I_{K1} \\ I_{K1} + I_{K2} \\ I_{K2} + I_{K3} \\ I_{K3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 5.2 \times 10^{-4} \\ 1.24 \times 10^{-3} \\ 8.4 \times 10^{-4} \\ 1.2 \times 10^{-4} \end{pmatrix} \text{ [А]}$$

Напряжения на резисторах:

$$U_i := I_i \cdot R_i \quad U = \begin{pmatrix} 0.52 \\ 2.48 \\ 2.52 \\ 0.48 \end{pmatrix} \text{ [В]}$$

1.2. Расчет параметров эквивалентного источника ЭДС методом узловых потенциалов



$$E_T := \frac{-\frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} - \frac{E_3}{R_3}}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}} = -0.545 \text{ [В]} \quad R_T := \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right)^{-1} = 545.455 \text{ [Ом]}$$

Сравнение с результатами расчета тока и напряжения на R4

$$I_{R4} := \frac{E_T}{R_T + R_4} = -1.2 \times 10^{-4} \text{ [А]} \quad U_{R4} := \frac{E_T \cdot R_4}{R_T + R_4} = -0.48 \text{ [В]}$$

2. Обработка результатов измерений

2.1. Расчет погрешности экспериментального определения токов и напряжений

Введите измеренные значения токов и напряжений на резисторах:

$$U_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 0.51 \\ 2.47 \\ 2.55 \\ 0.50 \end{pmatrix} \text{ [В]}$$

$$I_{\text{exp}} := \begin{pmatrix} 0.52 \\ 1.28 \\ 0.87 \\ 0.14 \end{pmatrix} \text{ [мА]}$$

$$\Delta U_i := |U_i - U_{\text{exp}i}|$$

$$\Delta I_i := |I_i \cdot 10^3 - I_{\text{exp}i}|$$

$$\Delta U = \begin{pmatrix} 0.01 \\ 0.01 \\ 0.03 \\ 0.02 \end{pmatrix} \text{ [В]}$$

$$\Delta I = \begin{pmatrix} 0 \\ 0.04 \\ 0.03 \\ 0.02 \end{pmatrix} \text{ [мА]}$$

2.2. Расчет погрешности экспериментального определения параметров эквивалентного источника ЭДС

Введите измеренные значения напряжения холостого хода и тока короткого замыкания:

$$U_{\text{xx}} := -0.5 \text{ [В]}$$

$$I_{\text{кз}} := -1 \cdot 10^{-3} \text{ [А]}$$

$$R_{T_exp} := \frac{U_{\text{xx}}}{I_{\text{кз}}} = 500 \text{ [Ом]}$$

$$\Delta E_T := |U_{\text{xx}} - E_T| = 0.045 \text{ [В]}$$

$$\Delta R_T := |R_{T_exp} - R_T| = 45.455 \text{ [Ом]}$$

Лабораторная работа № 2

RC-ЦЕПИ ПРИ ГАРМОНИЧЕСКОМ ВНЕШНЕМ ВОЗДЕЙСТВИИ

Задайте номиналы элементов исследуемой цепи, амплитуду гармонического напряжения генератора, его начальную фазу и частоту:

$$R_6 := 30 \cdot 10^3 \quad [\text{Ом}] \quad C_1 := 2.4 \cdot 10^{-9} \quad [\text{Ф}] \quad C_2 := 2.4 \cdot 10^{-9} \quad [\text{Ф}] \quad \text{ORIGIN} := 1$$

$$f_0 := \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R_6 \cdot C_1} = 2.21 \times 10^3 \quad [\text{Гц}] \quad E_m := 1 \quad [\text{В}] \quad \varphi_E := 0 \quad [\text{град}]$$

1. Обработка результатов измерений при $C_2 := C_1$

Расчет комплексных амплитуд напряжений на конденсаторе и резисторе:

$$E := E_m \cdot \exp(j \cdot \varphi_E) \quad U_C := E \cdot \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C} \quad U_R := E \cdot \frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C}$$

$$E = 1 \quad [\text{В}] \quad U_C = 0.5 - 0.5j \quad [\text{В}] \quad U_R = 0.5 + 0.5j \quad [\text{В}]$$

Расчет амплитуд и начальных фаз напряжений на конденсаторе и резисторе:

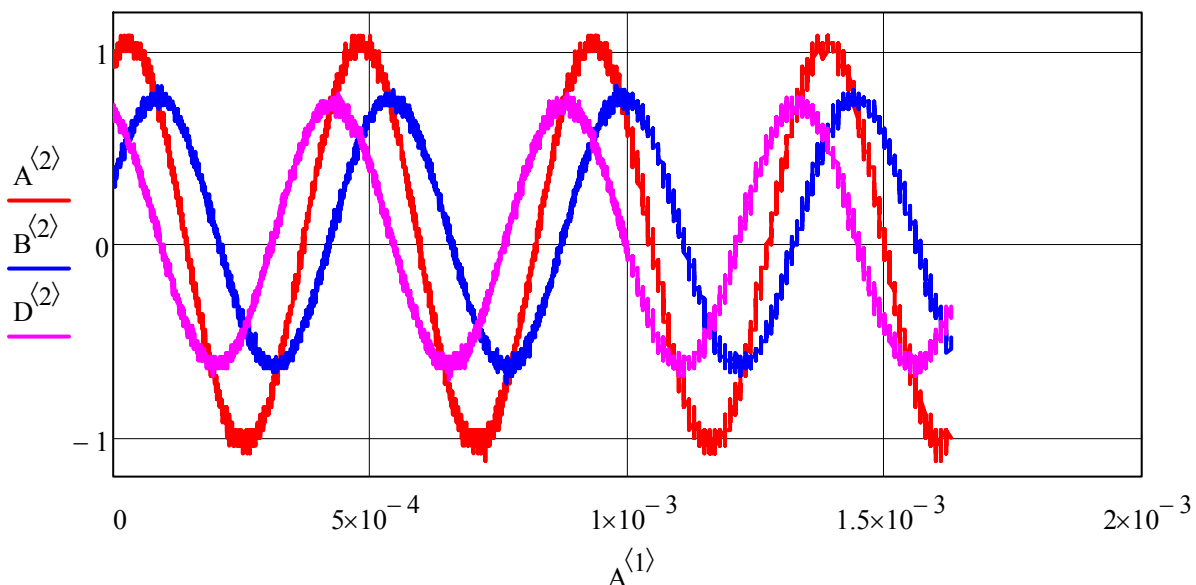
$$U_{Cm} := |U_C| \quad \varphi_C := \arg(U_C) \quad U_{Rm} := |U_R| \quad \varphi_R := \arg(U_R)$$

$$U_{Cm} = 0.707 [\text{В}] \quad \varphi_C = -45 \cdot \text{deg} \quad U_{Rm} = 0.707 [\text{В}] \quad \varphi_R = 45 \cdot \text{deg}$$

Считываем осциллограммы напряжений на резисторе и конденсаторе из файлов:

- входное напряжение: $A := \text{READPRN}("1.csv")$
- напряжение на конденсаторе: $B := \text{READPRN}("2.csv")$
- напряжение на резисторе: $D := \text{READPRN}("3.csv")$

Осциллограммы напряжений на резисторе и конденсаторе



Определяем амплитуды сигналов по осциллограммам в режиме трассировки:

$$E_m := [1.08 - (-1.04)] \cdot 0.5 \quad [B] \quad E_m = 1.06 \quad [B]$$

$$U_{Cm} := [0.78 - (-0.66)] \cdot 0.5 \quad [B] \quad U_{Cm} = 0.72 \quad [B]$$

$$U_{Rm} := [0.74 - (-0.64)] \cdot 0.5 \quad [B] \quad U_{Rm} = 0.69 \quad [B]$$

Определяем временные сдвиги сигналов по осциллограммам в режиме трассировки:

$$\Delta t_C := 0.000538 - 0.000486 \quad [c] \quad \Delta t_C = 5.2 \times 10^{-5} \quad [c]$$

$$\Delta t_R := 0.00043 - 0.000486 \quad [c] \quad \Delta t_R = -5.6 \times 10^{-5} \quad [c]$$

Определяем период, контролируем значение частоты сигналов:

$$T := 0.000931 - 0.000486 \quad [c] \quad \frac{1}{T} = 2.247 \times 10^3 \quad [Гц]$$

Рассчитываем начальные фазы сигналов:

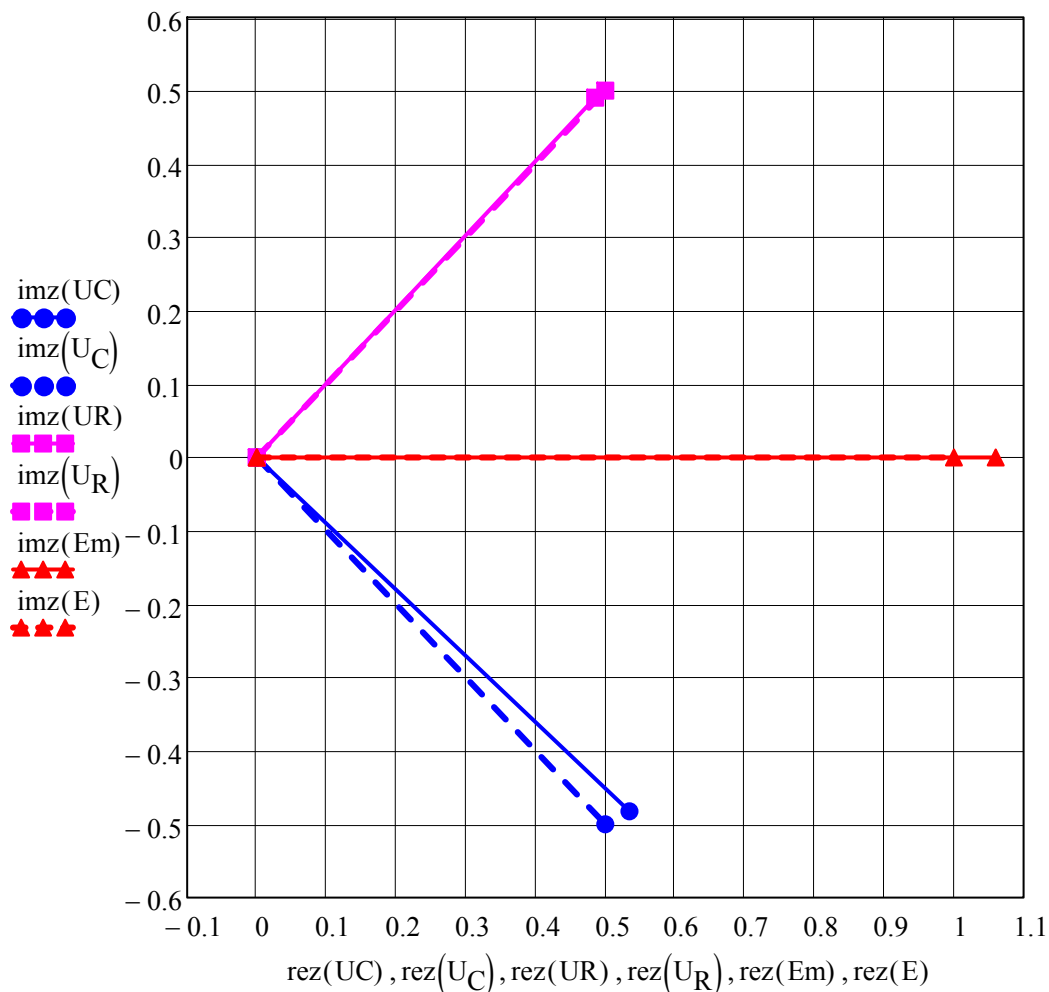
$$\varphi_C := -2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta t_C}{T} = -42.067 \cdot \text{deg} \quad [\text{град}] \quad \varphi_R := -2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta t_R}{T} = 45.303 \cdot \text{deg} \quad [\text{град}]$$

$$U_C := U_{Cm} \cdot \exp(j \cdot \varphi_C) = 0.534 - 0.482j \quad [B]$$

$$U_R := U_{Rm} \cdot \exp(j \cdot \varphi_R) = 0.485 + 0.49j \quad [B]$$

$$\text{rez}(z) := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Re}(z) \end{pmatrix} \quad \text{imz}(z) := \begin{pmatrix} 0 \\ \text{Im}(z) \end{pmatrix}$$

Векторные диаграммы напряжений



Проверка выполнения II закона Кирхгофа:

$$U_C + U_R - E = 0 \qquad UC + UR - Em = -0.04 + 8.077j \times 10^{-3}$$

2. Обработка результатов измерений при $C := C_1 + C_2 = 4.8 \times 10^{-9}$ [Ф]

Расчет комплексных амплитуд напряжений на конденсаторе и резисторе:

$$U_C := E \cdot \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C} \qquad U_R := E \cdot \frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C}$$

$$U_C = 0.2 - 0.4j \quad [B] \qquad U_R = 0.8 + 0.4j \quad [B]$$

Расчет амплитуд и начальных фаз напряжений на конденсаторе и резисторе:

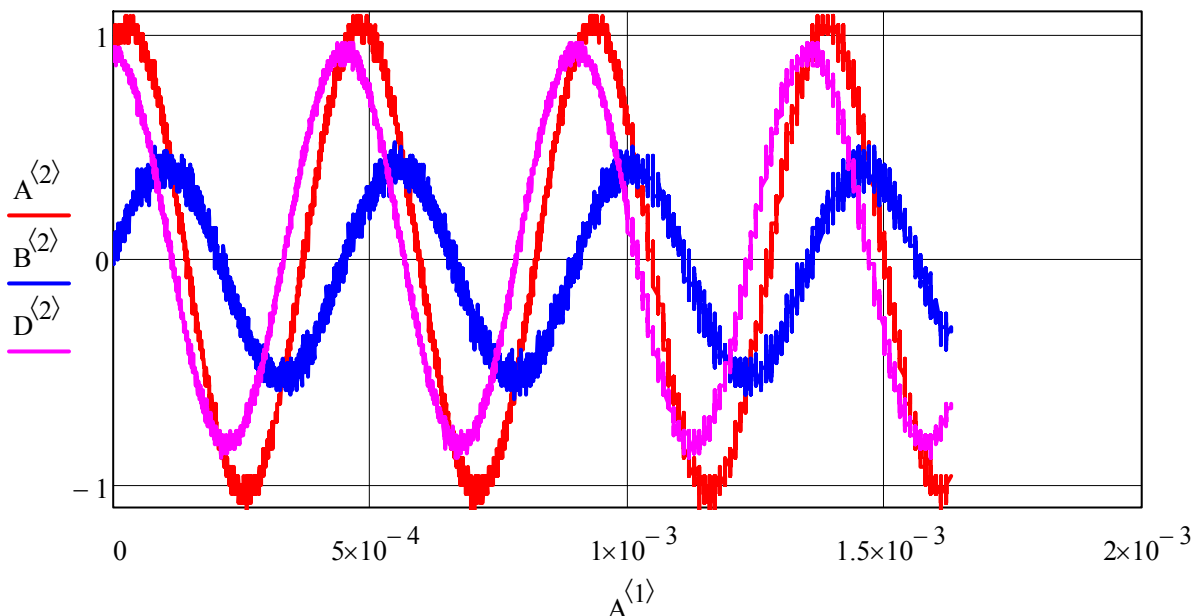
$$U_{Cm} := |U_C| \qquad \varphi_C := \arg(U_C) \qquad U_{Rm} := |U_R| \qquad \varphi_R := \arg(U_R)$$

$$U_{Cm} = 0.447 [B] \quad \varphi_C = -63.435 \cdot \text{deg} \qquad U_{Rm} = 0.894 [B] \quad \varphi_R = 26.565 \cdot \text{deg}$$

Считываем осциллограммы напряжений на резисторе и конденсаторе из файлов:

- входное напряжение: $A := \text{READPRN}("4.csv")$
- напряжение на конденсаторе: $B := \text{READPRN}("5.csv")$
- напряжение на резисторе: $D := \text{READPRN}("6.csv")$

Осциллограммы напряжений на резисторе и конденсаторе



Определяем амплитуды сигналов по осциллограммам в режиме трассировки:

$$Em := [1.04 - (-1.08)] \cdot 0.5 \quad [B] \qquad Em = 1.06 \quad [B]$$

$$UCm := [0.48 - (-0.56)] \cdot 0.5 \quad [B] \qquad UCm = 0.52 \quad [B]$$

$$URm := [0.96 - (-0.84)] \cdot 0.5 \quad [B] \qquad URm = 0.9 \quad [B]$$

Определяем временные сдвиги сигналов по осциллограммам в режиме трассировки:

$$\Delta t_C := 0.000558 - 0.000482 \quad [c] \quad \Delta t_C = 7.6 \times 10^{-5} \quad [c]$$

$$\Delta t_R := 0.000455 - 0.000482 \quad [c] \quad \Delta t_R = -2.7 \times 10^{-5} \quad [c]$$

Определяем период, контролируем значение частоты сигналов:

$$T := 0.000939 - 0.000482 \quad [c] \quad \frac{1}{T} = 2.188 \times 10^3 \quad [Гц]$$

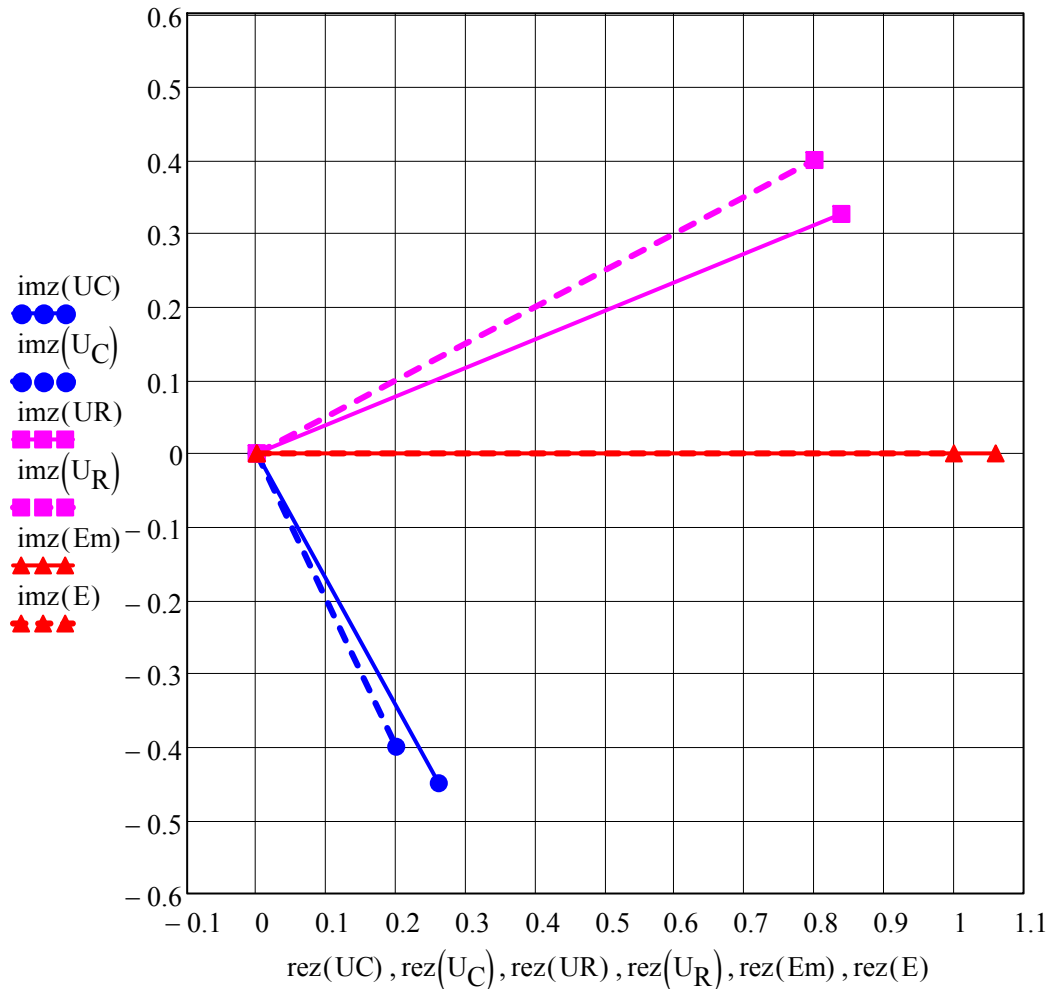
Рассчитываем начальные фазы сигналов:

$$\varphi_C := -2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta t_C}{T} = -59.869 \cdot \text{deg} \quad [\text{град}] \quad \varphi_R := -2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta t_R}{T} = 21.269 \cdot \text{deg} \quad [\text{град}]$$

$$U_C := U_{Cm} \cdot \exp(j \cdot \varphi_C) = 0.261 - 0.45j \quad [B]$$

$$U_R := U_{Rm} \cdot \exp(j \cdot \varphi_R) = 0.839 + 0.326j \quad [B]$$

Векторные диаграммы напряжений



Проверка выполнения II закона Кирхгофа:

$$U_C + U_R - E = 0$$

$$U_C + U_R - E_m = 0.04 - 0.123j$$

3. Обработка результатов измерений при $C_{\text{мкв}} := \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} = 1.2 \times 10^{-9}$ [Ф]

Расчет комплексных амплитуд напряжений на конденсаторе и резисторе:

$$U_{C\text{мкв}} := E \cdot \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C} \quad U_{R\text{мкв}} := E \cdot \frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R_6 \cdot C}$$

$$U_C = 0.8 - 0.4j \quad [\text{В}] \quad U_R = 0.2 + 0.4j \quad [\text{В}]$$

Расчет амплитуд и начальных фаз напряжений на конденсаторе и резисторе:

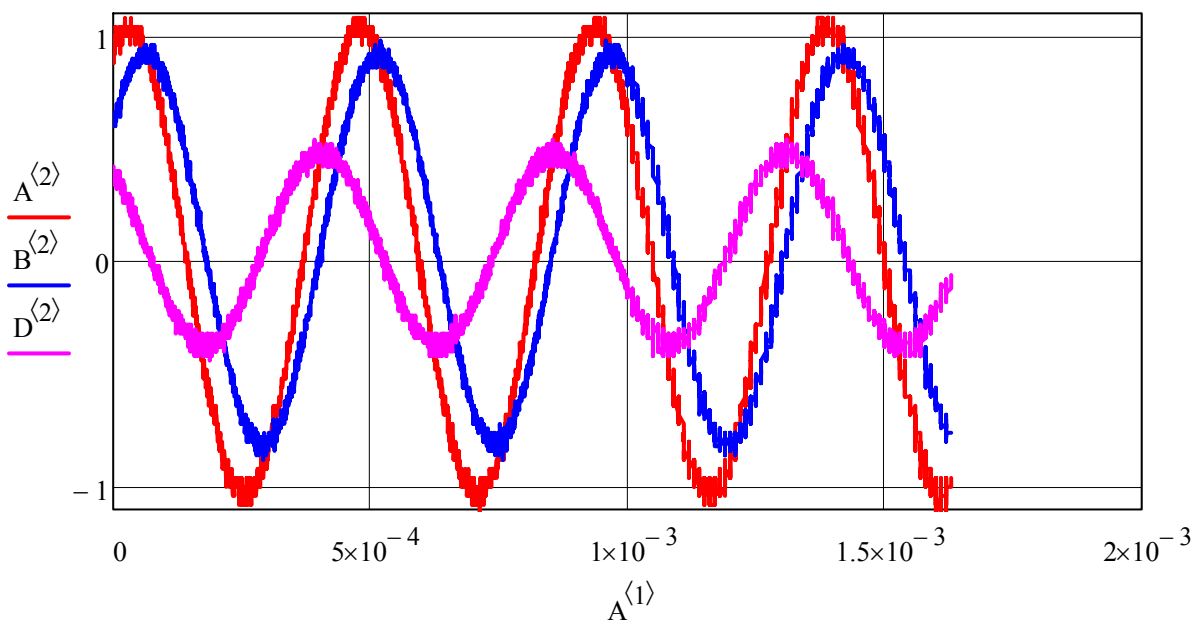
$$U_{C\text{мкв}} := |U_C| \quad \varphi_C := \arg(U_C) \quad U_{R\text{мкв}} := |U_R| \quad \varphi_R := \arg(U_R)$$

$$U_{C\text{м}} = 0.894 [\text{В}] \quad \varphi_C = -26.565 \cdot \text{deg} \quad U_{R\text{м}} = 0.447 [\text{В}] \quad \varphi_R = 63.435 \cdot \text{deg}$$

Считываем осциллограммы напряжений на резисторе и конденсаторе из файлов:

- входное напряжение: $A := \text{READPRN}("7.csv")$
- напряжение на конденсаторе: $B := \text{READPRN}("8.csv")$
- напряжение на резисторе: $D := \text{READPRN}("9.csv")$

Осциллограммы напряжений на резисторе и конденсаторе



Определяем амплитуды сигналов по осциллограммам в режиме трассировки:

$$E_{\text{м}} := [1.08 - (-1.08)] \cdot 0.5 \quad [\text{В}] \quad E_{\text{м}} = 1.08 \quad [\text{В}]$$

$$U_{C\text{м}} := [0.92 - (-0.84)] \cdot 0.5 \quad [\text{В}] \quad U_{C\text{м}} = 0.88 \quad [\text{В}]$$

$$U_{R\text{м}} := [0.5 - (-0.38)] \cdot 0.5 \quad [\text{В}] \quad U_{R\text{м}} = 0.44 \quad [\text{В}]$$

Определяем временные сдвиги сигналов по осциллограммам в режиме трассировки:

$$\Delta t_C := 0.000517 - 0.000478 \quad [c] \quad \Delta t_C = 3.9 \times 10^{-5} \quad [c]$$

$$\Delta t_R := 0.000406 - 0.000478 \quad [c] \quad \Delta t_R = -7.2 \times 10^{-5} \quad [c]$$

Определяем период, контролируем значение частоты сигналов:

$$T := 0.000938 - 0.000478 \quad [c] \quad \frac{1}{T} = 2.174 \times 10^3 \quad [Гц]$$

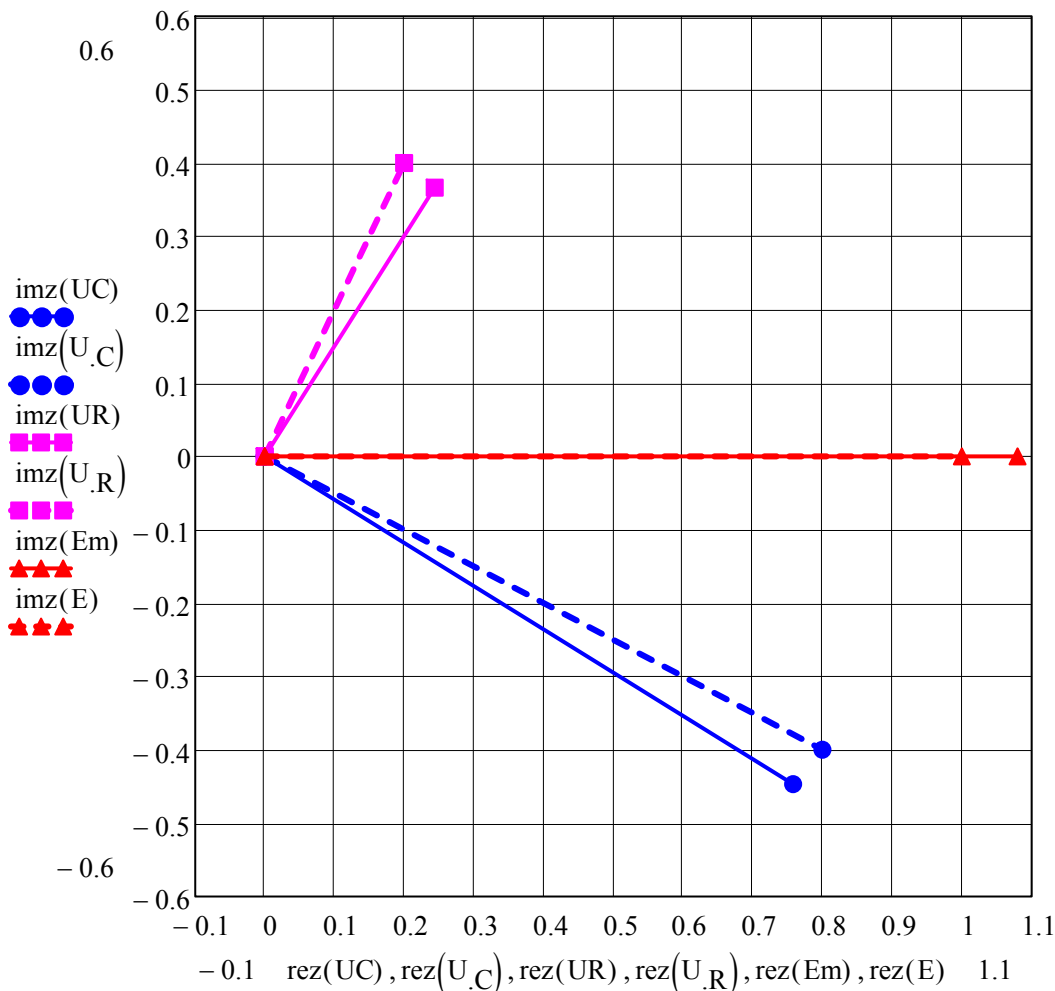
Рассчитываем начальные фазы сигналов:

$$\varphi_C := -2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta t_C}{T} = -30.522 \cdot \text{deg} \quad [\text{град}] \quad \varphi_R := -2 \cdot \pi \cdot \frac{\Delta t_R}{T} = 56.348 \cdot \text{deg} \quad [\text{град}]$$

$$U_C := U_{Cm} \cdot \exp(j \cdot \varphi_C) = 0.758 - 0.447j \quad [B]$$

$$U_R := U_{Rm} \cdot \exp(j \cdot \varphi_R) = 0.244 + 0.366j \quad [B]$$

Векторные диаграммы напряжений



Проверка выполнения II закона Кирхгофа:

$$U_C + U_R - E = 0$$

$$U_C + U_R - E_m = -0.078 - 0.081j$$

Лабораторная работа № 3

Частотные характеристики RC-цепей

ORIGIN := 1 - нумерация элементов массивов с "1"

Задайте номиналы элементов RC-цепи:

$$R_1 := 3.3 \cdot 10^3 \text{ [Ом]} \quad C_1 := 2.4 \cdot 10^{-9} \text{ [Ф]} \quad C_4 := 30 \cdot 10^{-9} \text{ [Ф]} \quad j := \sqrt{-1}$$

$$\tau_1 := R_1 \cdot C_4 = 9.9 \times 10^{-5} \text{ [с]} \quad \text{- постоянная времени RC-цепи}$$

$$f_c := \frac{1}{\tau_1 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^3} = 1.608 \text{ [Гц]} \quad \text{- частота среза}$$

Комплексные коэффициенты передачи последовательной RC-цепи:

$$K_{\Phi\text{НЧ}}(f) := \frac{1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot \tau_1} \quad K_{\Phi\text{ВЧ}}(f) := \frac{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot \tau_1}{1 + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot \tau_1}$$

Комплексный коэффициент передачи фильтра Вина:

$$\tau_2 := R_1 \cdot C_1 = 7.92 \times 10^{-6} \text{ [с]}$$

$$K_{\text{ПФ}}(f) := \frac{1}{3 + j \cdot \left(2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot \tau_2 - \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot \tau_2} \right)}$$

$$f_0 := \frac{1}{\tau_2 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^3} = 20.095 \text{ [Гц]} \quad \text{- частота при максимальном значении КП}$$

Исследование ФНЧ

Заполните колонки таблицы результатами измерений:

1-ю - отсчетами частоты, кГц;

2-ю - значениями амплитуд входного сигнала, В;

3-ю - значениями амплитуд выходного сигнала, В;

4-ю - значениями временных сдвигов выходного сигнала относительно входного, мкс;

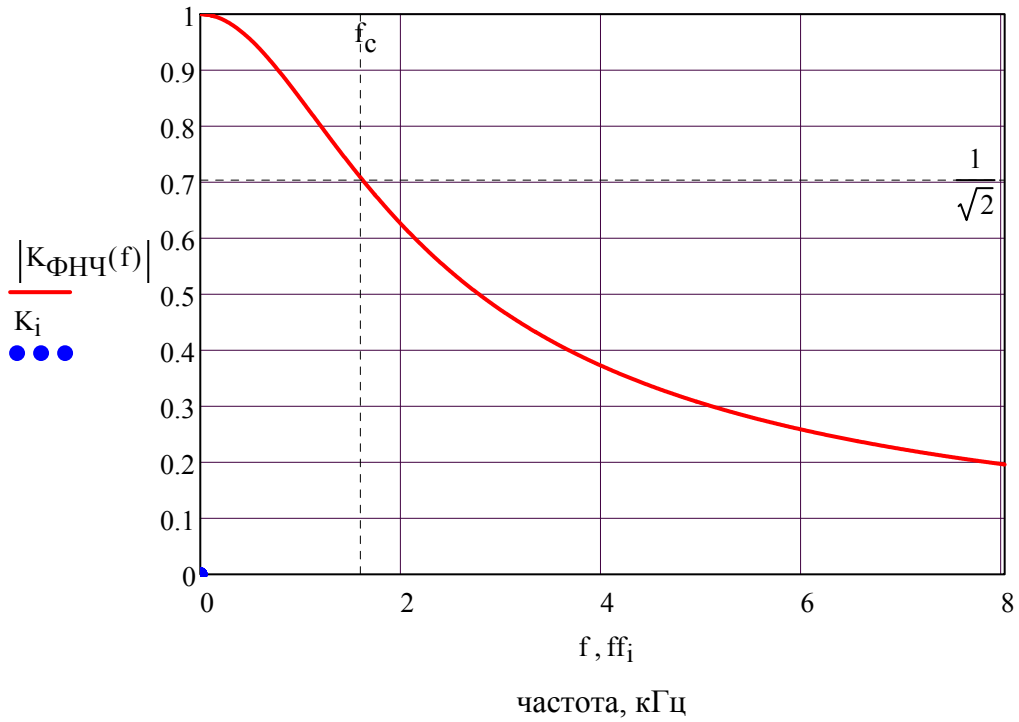
A :=

	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	...

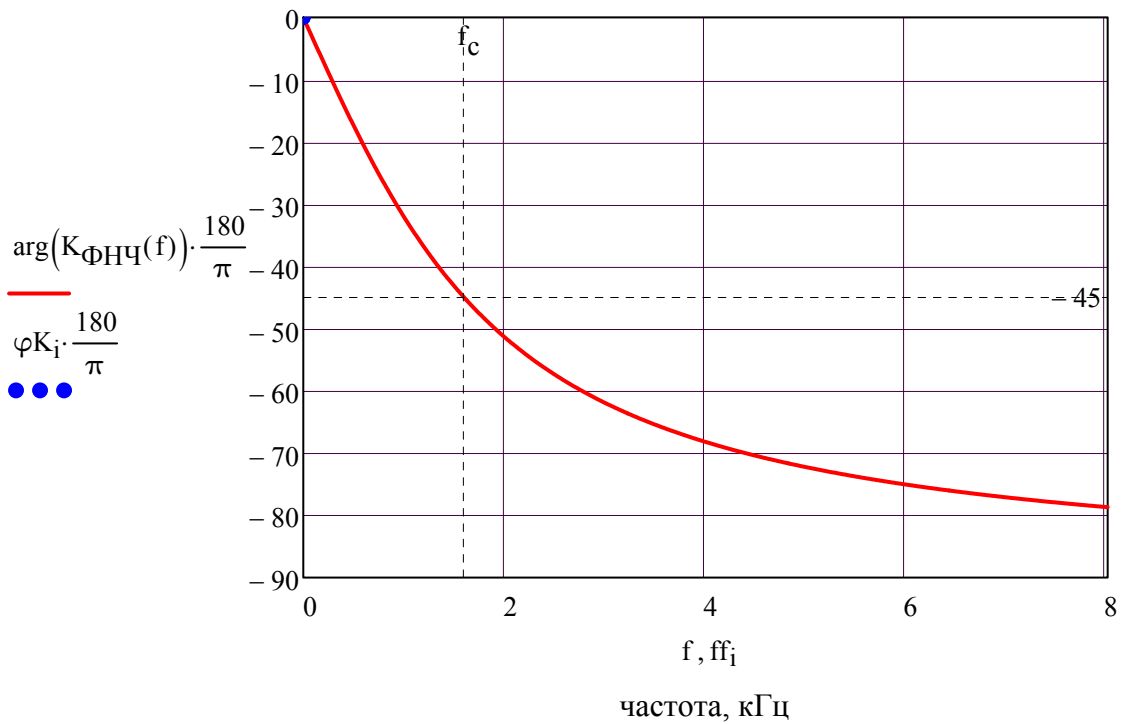
$i := 1..10$

$ff_i := A_{i,1}$ $K_i := \frac{A_{i,3}}{A_{i,2}}$ $\varphi K_i := 2 \cdot \pi \cdot A_{i,1} \cdot A_{i,4} \cdot 10^{-3}$

Амплитудно-частотная характеристика



Фазо-частотная характеристика



Исследование ФВЧ

Заполните колонки таблицы результатами измерений:

1-ю - отсчетами частоты, кГц;

2-ю - значениями амплитуд входного сигнала, В;

3-ю - значениями амплитуд выходного сигнала, В;

4-ю - значениями временных сдвигов выходного сигнала относительно входного, мкс

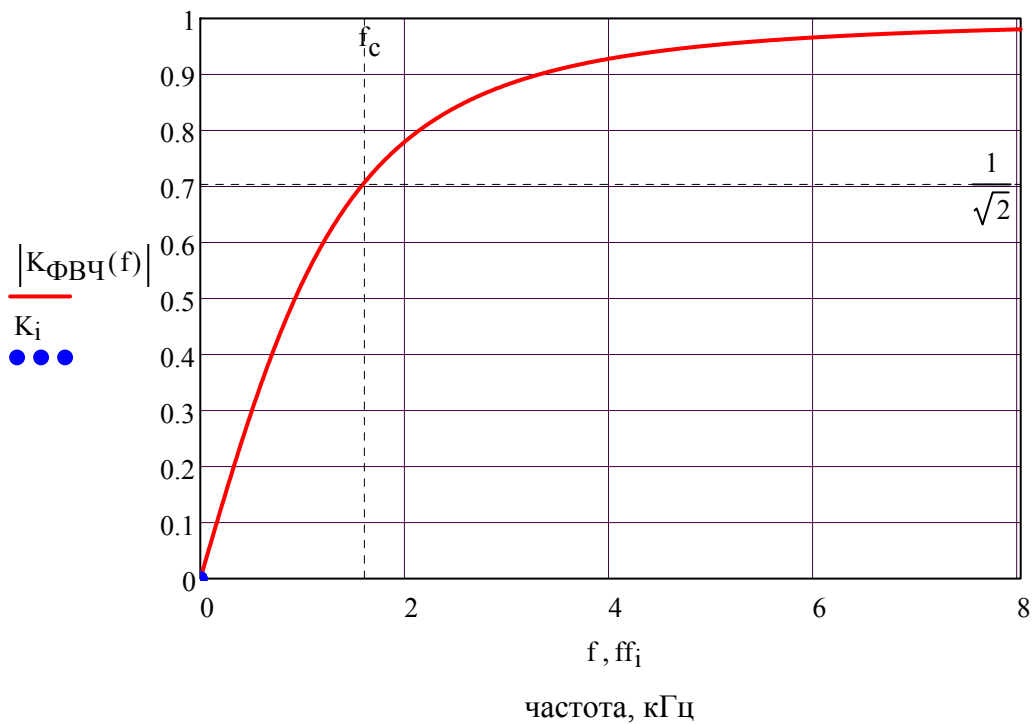
$A :=$

	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0

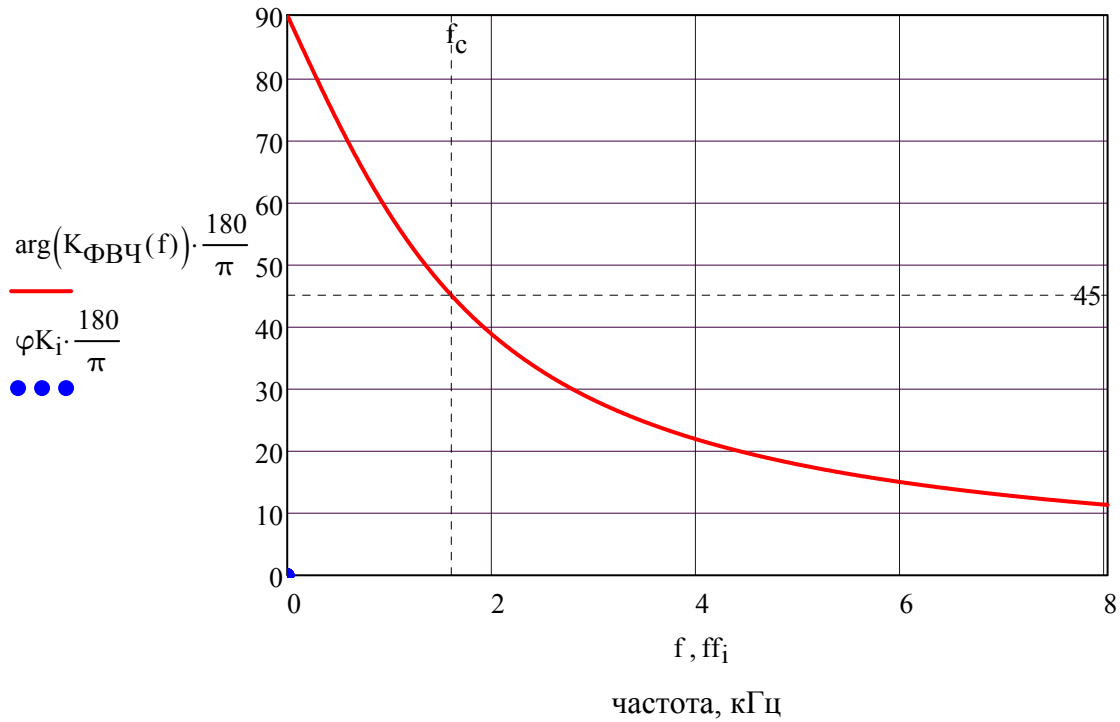
$i := 1..10$

$$ff_i := A_{i,1} \quad K_i := \frac{A_{i,3}}{A_{i,2}} \quad \varphi K_i := 2 \cdot \pi \cdot A_{i,1} \cdot A_{i,4} \cdot 10^{-3}$$

Амплитудно-частотная характеристика



Фазо-частотная характеристика



Исследование фильтра Вина

Заполните колонки таблицы результатами измерений:

1-ю - отсчетами частоты, кГц;

2-ю - значениями амплитуд входного сигнала, В;

3-ю - значениями амплитуд выходного сигнала, В;

4-ю - значениями временных сдвигов выходного сигнала относительно входного, мкс

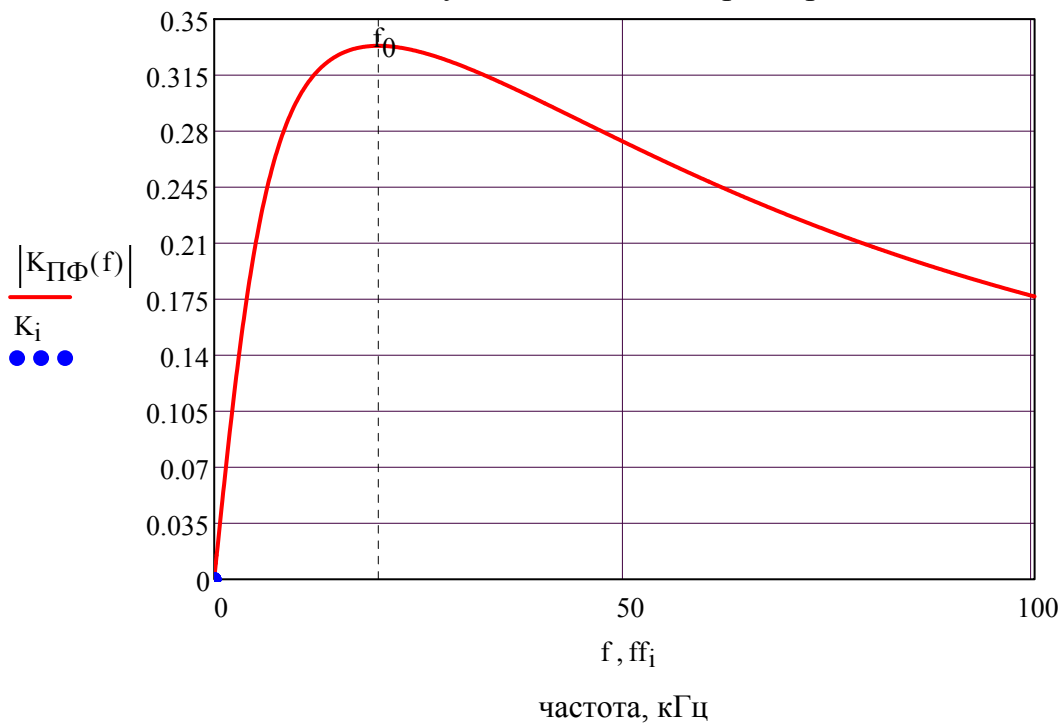
$A :=$

	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0

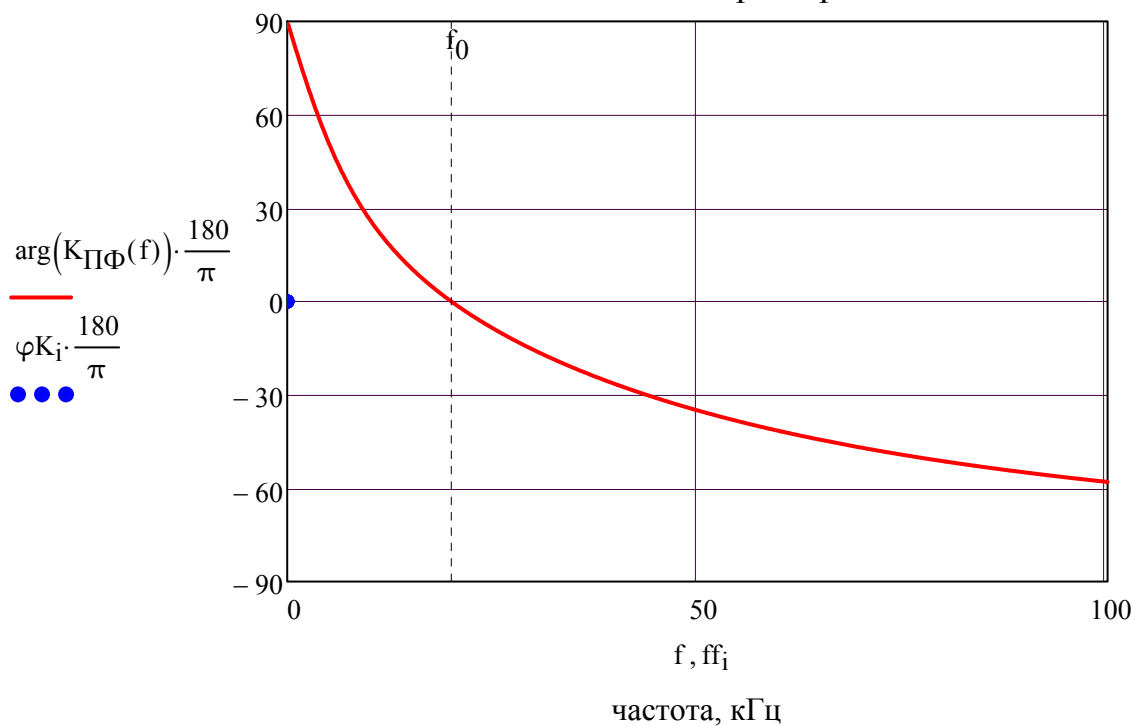
$i := 1..10$

$ff_i := A_{i,1}$
 $K_i := \frac{A_{i,3}}{A_{i,2}}$
 $\varphi K_i := 2 \cdot \pi \cdot A_{i,1} \cdot A_{i,4} \cdot 10^{-3}$

Амплитудно-частотная характеристика



Фазо-частотная характеристика



Лабораторная работа № 4

Частотные характеристики последовательного колебательного контура

ORIGIN := 1 - нумерация элементов массивов с "1"

Задайте номиналы элементов колебательного контура:

$$R_8 := 36 \text{ [Ом]} \quad L_1 := 1.77 \cdot 10^{-3} \text{ [Гн]} \quad C_1 := 2.4 \cdot 10^{-9} \text{ [Ф]} \quad j := \sqrt{-1}$$

$Q_1 := 80$ - добротность контура с учетом потерь в катушке и генераторе

$$\rho := \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} = 858.778 \text{ [Ом]} \text{ - характеристическое сопротивление}$$

$r_r := 5 \text{ [Ом]}$ - потери в генераторе

$$r_L := \frac{\rho}{Q_1} - r_r = 5.735 \text{ - потери в катушке}$$

$$f_p := \frac{1}{\sqrt{L_1 \cdot C_1} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 10^3} = 77.22 \text{ [кГц]} \text{ - резонансная частота}$$

Комплексные коэффициенты передачи:

$$K_1(f) := \frac{\frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot C_1}}{\frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot C_1} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot L_1 + r_r + r_L}$$

$$K_2(f) := \frac{\frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot C_1}}{\frac{1}{j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot C_1} + j \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot 10^3 \cdot L_1 + R_8 + r_r + r_L}$$

Исследование 1-й резонансной цепи:

Заполните колонки таблицы результатами измерений:

1-ю - отсчетами частоты, кГц;

2-ю - значениями амплитуд входного сигнала, мВ;

3-ю - значениями амплитуд выходного сигнала, мВ;

4-ю - значениями временных сдвигов выходного сигнала относительно входного, мкс

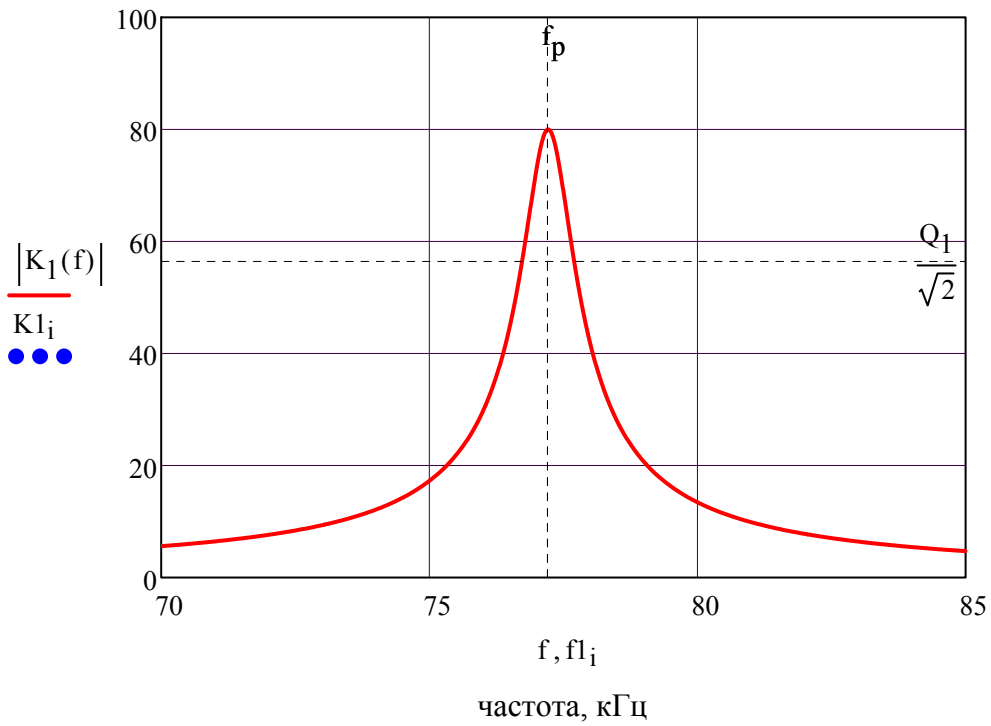
$A :=$

	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	...

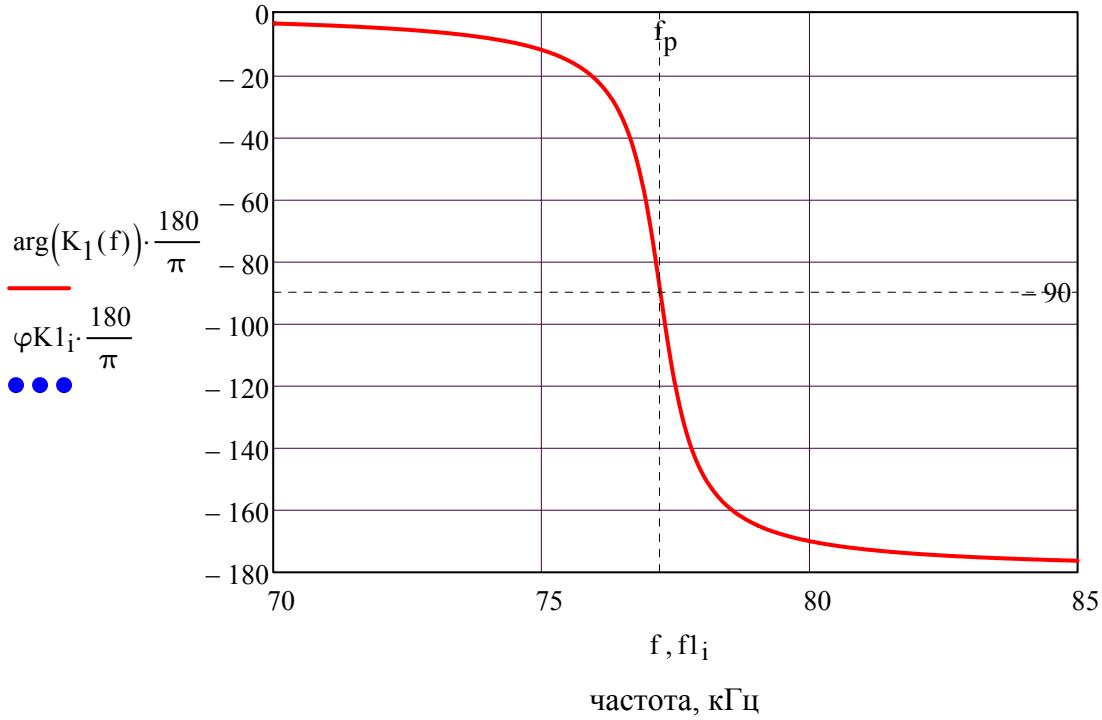
$i := 1..12$

$f_{l_i} := A_{i,1}$
 $K_{l_i} := \frac{A_{i,3}}{A_{i,2}}$
 $\varphi_{K_{l_i}} := 2 \cdot \pi \cdot A_{i,1} \cdot A_{i,4} \cdot 10^{-3}$

Амплитудно-частотная характеристика



Фазо-частотная характеристика



Исследование 2-й резонансной цепи:

Заполните колонки таблицы результатами измерений:

1-ю - отсчетами частоты, кГц;

2-ю - значениями амплитуд входного сигнала, В;

3-ю - значениями амплитуд выходного сигнала, В;

4-ю - значениями временных сдвигов выходного сигнала относительно входного, мкс;

$A :=$

	1	2	3	4
1	0	0	0	0
2	0	0	0	0
3	0	0	0	0
4	0	0	0	0
5	0	0	0	0
6	0	0	0	0
7	0	0	0	0
8	0	0	0	0
9	0	0	0	0
10	0	0	0	0

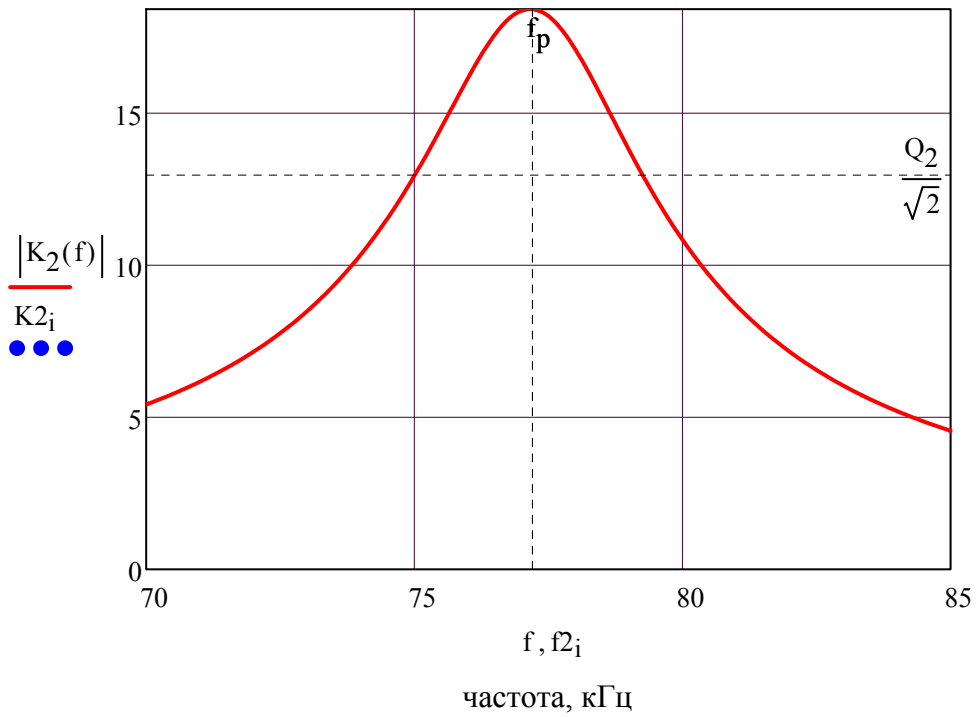
$$i := 1..10$$

$$Q_2 := \frac{\rho}{r_L + r_T + R_8} = 18.376$$

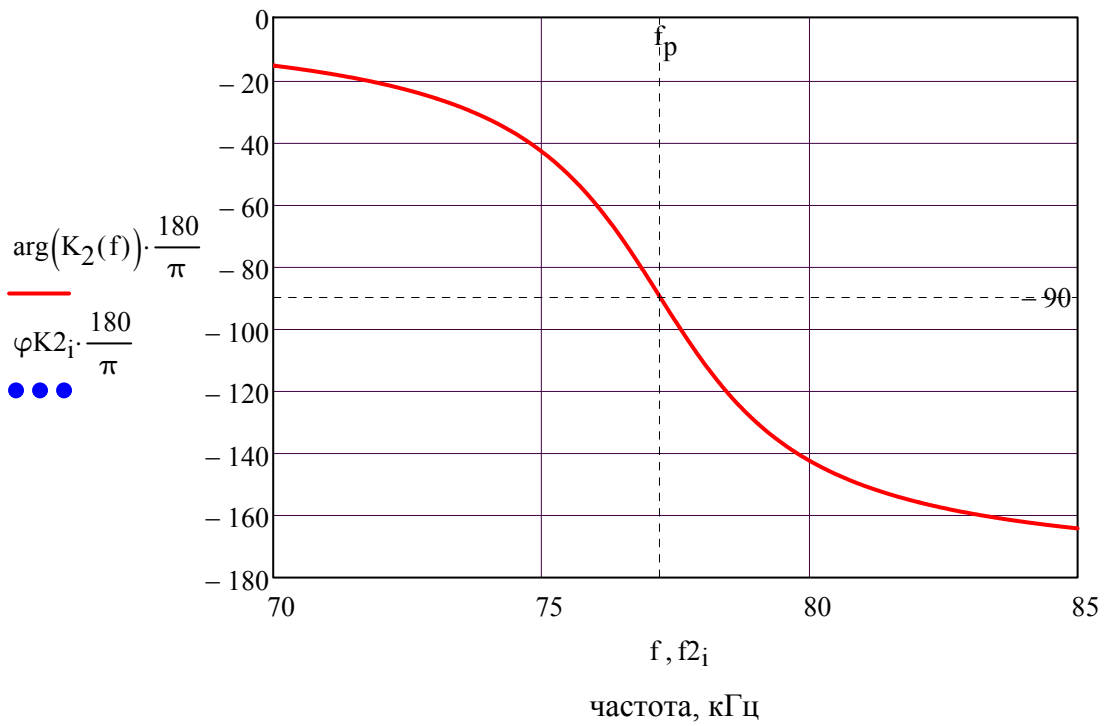
$$f_{2i} := A_{i,1} \quad K_{2i} := \frac{A_{i,3}}{A_{i,2}}$$

$$\varphi_{K2i} := 2 \cdot \pi \cdot A_{i,1} \cdot A_{i,4} \cdot 10^{-3}$$

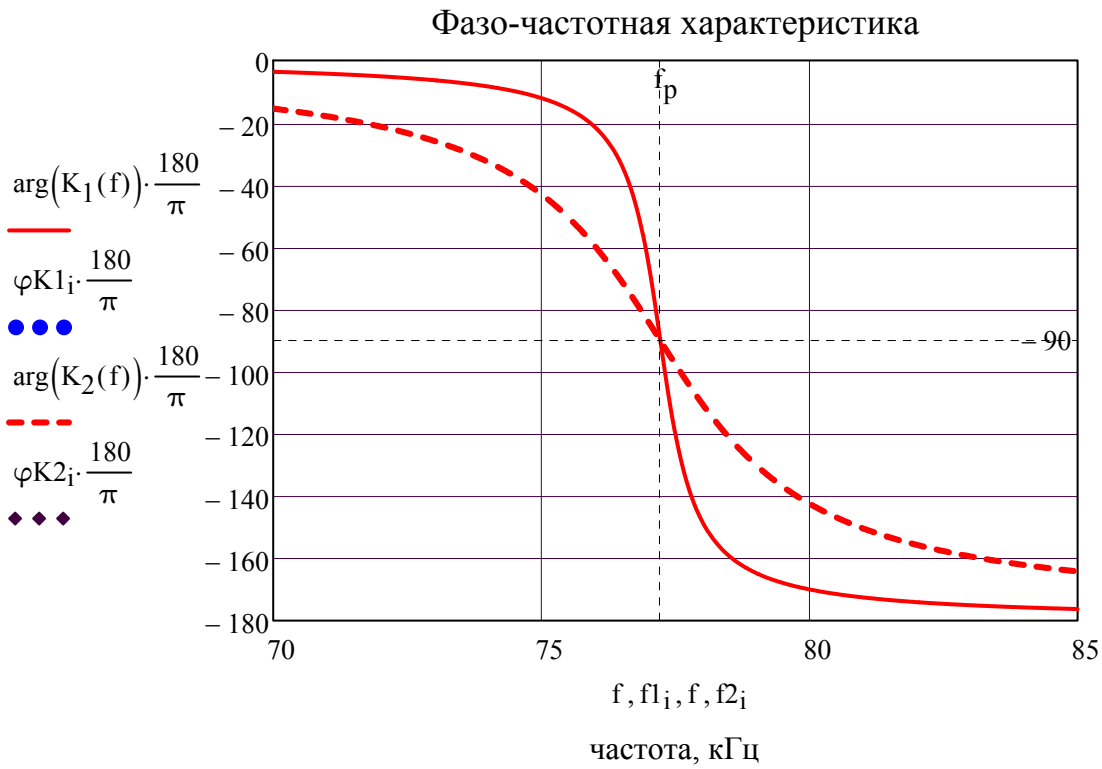
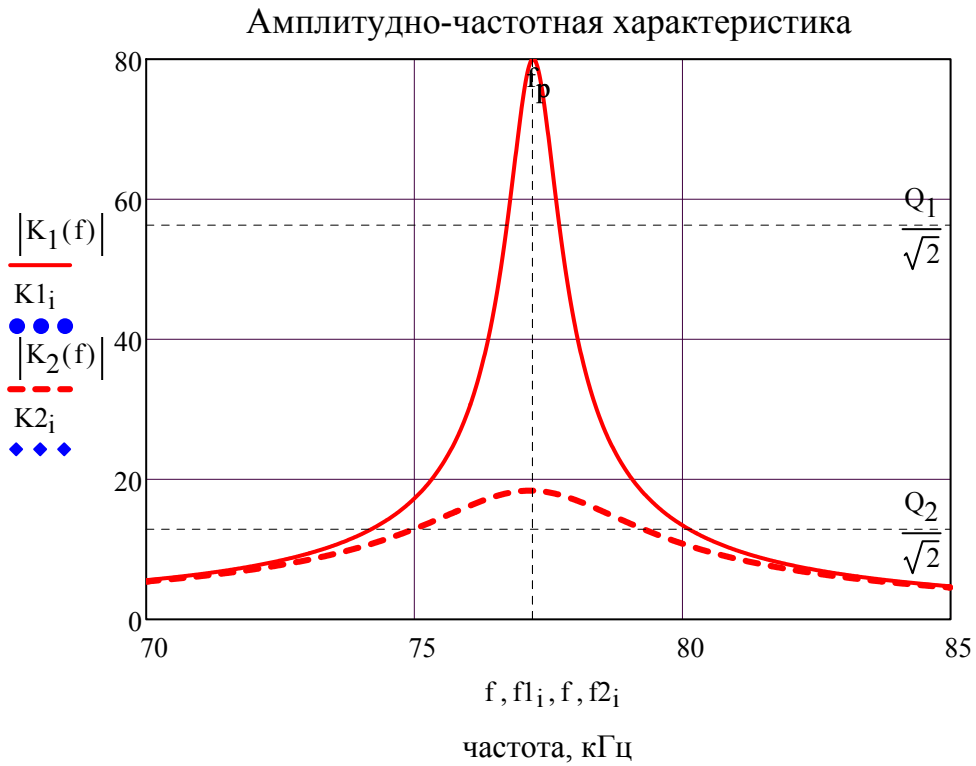
Амплитудно-частотная характеристика



Фазо-частотная характеристика



Сопоставление АЧХ и ФЧХ 1-й и 2-й резонансной цепей:



Инструкция для работы с цифровым осциллографом **Hantek DSO4072C**

Содержание

1	Органы управления.....	2
2	Управление осциллографом	3
2.1	Настройка аналоговых каналов.....	3
2.2	Измерение параметров сигнала.....	3
2.3	Работа с курсорами.....	4
2.4	Сохранение данных	4
3	Управление генератором.....	5
3.1	Установка монохроматического сигнала.....	5
3.2	Установка пилообразного сигнала	5
3.3	Установка прямоугольного сигнала	6
3.4	Установка трапециевидного сигнала.....	6
3.5	Установка постоянного сигнала.....	7
3.6	Установка модулированного сигнала.....	7
4	Открытие сохранённых данных в MathCAD	8

1 Органы управления

На рис. 1 изображена лицевая панель осциллографа. Управление функциональными возможностями производится с помощью следующих клавиш и ручек:

1. Кнопка включения.
2. Порт для SD-карты.
3. USB-порт.
4. Калибровочный выход.
5. Функциональные клавиши F1-F6.
6. Выход генератора.
7. Вход синхронизации времени развертки.
8. Аналоговые входы.
9. Отсутствует в настоящей модели.
10. Клавиша меню.
11. Ручка "V0".
12. Панель работы с данными.
13. Панель управления временем развёртки.
14. Панель управления синхросигналами.
15. Панель управления запуском.
16. Панель управления аналоговым входом.
17. Клавиша включения генератора.
18. Клавиша настроек генератора.
19. Вход внешней синхронизации.

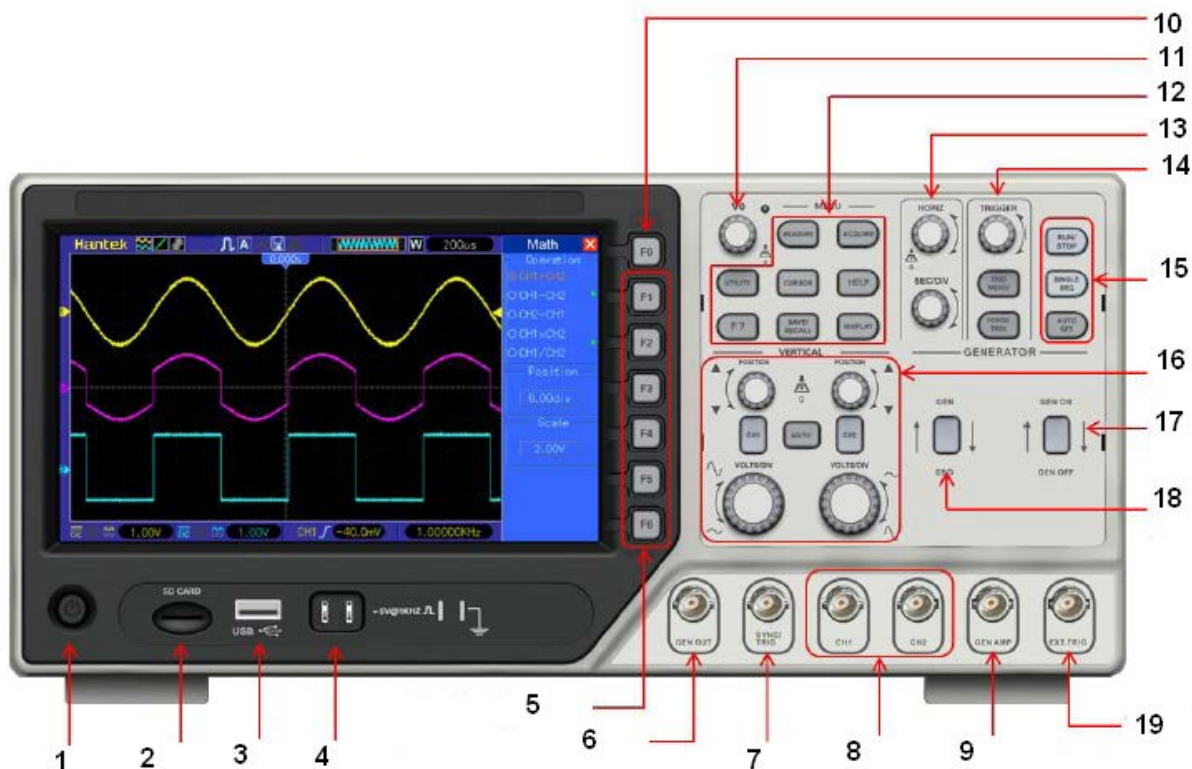


Рис. 1. Лицевая панель осциллографа

2 Управление осциллографом

Цифровой осциллограф включает в себя два аналоговых канала. Включение каждого из каналов производится нажатием клавиш “CH1” и “CH2” соответственно.

Масштабирование оцифрованного сигнала по оси ординат производится поворотом ручки «VOLTS/DIV”.

Смещение оцифрованного сигнала по оси ординат производится поворотом ручки “Position”.

Масштабирование оцифрованного сигнала по временной оси производится поворотом ручки “SEC/DIV”.

2.1 Настройка аналоговых каналов

Перед началом измерений необходимо настроить каждый из аналоговых каналов.

- Выберите канал для настройки нажав клавишу “CH1” или “CH2”.
- Установите режим развязки по постоянному току клавишей “F1”.
“DC” – входной каскад не отсекает постоянное значение сигнала.
“AC” – входной каскад отсекает постоянное значение сигнала.
“GND” – входной каскад подключается к нулевому потенциалу.
- Установите коэффициент передачи измерительного щупа “Probe” нажатием клавиши “F4”.

*Если входной щуп не подключен, то необходимо установить значение “1x”.
Если входной щуп подключен, то необходимо установить значение указанное на измерительном щупе.*

- По требованию измените полярность входного сигнала нажатием клавиши “F5”.

2.2 Измерение параметров сигнала

Для каждого из аналоговых каналов доступен набор измерений основных параметров сигналов, таких как амплитуда, частота, период, размах, времени нарастания и время спада фронта и т.д.

- Нажмите клавишу “MEASURE”.
- Если требуемого параметра нет в текущих измерениях, то с помощью поворота ручки “V0” выберите параметр, который можно заменить и нажмите клавишу “F6”.
- С помощью поворота ручки “V0” выберите нужный параметр из списка и нажмите клавишу “F6”

2.3 Работа с курсорами

Для измерения нестандартных параметров сигнала осциллограф поддерживает работу с курсорами. Курсоры – это контрольные точки, с помощью которых можно анализировать простые параметры эпюр сигналов.

- Нажмите клавишу “CURSOR”.
- Установите тип курсора нажатием клавиши “F1”.
“Time” – измерение временных параметров.
“Voltage” – измерение электрических параметров.
“Track” – измерение временных и электрических параметров.
- Выберите канал для измерений нажатием клавиш “F2” и “F3”.
- Переключайтесь между курсорами нажатием клавиши “F4”.

2.4 Сохранение данных

Сохранение данных возможно на внешний носитель типа USB или SD Card.

- Подключите внешний носитель данных в соответствующий вход.
- Нажмите клавишу “SAVE/RECALL”.
- Выберите формат “CSV” нажатием клавиши “F3”.
- Выберите канал для сохранения нажатием клавиши “F1”.
- Выберите нужный тип внешнего носителя клавишей “F5”.
- Для сохранения данных в новый файл нажмите клавишу “F2”.
- Для изменения готового файла нажмите клавишу “F3”.
- Для удаления сохранённого файла нажмите клавишу “F4”.

Выбор файла производится поворотом ручки “V0”.

Если на внешнем носителе находится много файлов, то операционной системе осциллографа потребуется время для поиска свободного места и может появиться ошибка с записью. В этом случае попробуйте повторить последовательность действий со второго пункта через 1-2 минуты.

3 Управление генератором

Цифровой осциллограф содержит встроенный генератор стандартных сигналов. Формируемый сигнал воспроизводится на аналоговом выходе “GEN OUT”. Для настройки генератора необходимо на лицевой панели включить клавишу “GEN/DSO”.

3.1 Установка монохроматического сигнала

- Перейдите в настройки генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.
- Выберите тип сигнала “Sine” на панели “Wave” с помощью клавиш “F1-F2”.
- Установите частоту сигнала нажав клавишу “F3”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”, установка с помощью нажатия на ручку “V0”, а завершение установки с помощью выбора размерности Hz-MHz клавишами “F1-F3”.
- Установите амплитуду сигнала нажав клавишу “F4”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите постоянное смещение сигнала нажав клавишу “F5”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Включите генератор нажав клавишу “GEN ON / GEN OFF”.
- Выйдите из настроек генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.

3.2 Установка пилообразного сигнала

- Перейдите в настройки генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.
- Выберите тип сигнала “Ramp” на панели “Wave” с помощью клавиш “F1-F2”.
- Установите частоту сигнала нажав клавишу “F3”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”, установка с помощью нажатия на ручку “V0”, а завершение установки с помощью выбора размерности Hz-MHz клавишами “F1-F3”.
- Установите амплитуду сигнала нажав клавишу “F4”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите постоянное смещение сигнала нажав клавишу “F5”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите форму сигнала. Для этого перейдите на страницу настроек №2 нажав клавишу “F8”. Затем включаем настройки формы сигнала “Wave ramp” нажав клавишу “F3” и устанавливаем требуемое значение поворотом ручки “V0”.
- Включите генератор нажав клавишу “GEN ON / GEN OFF”
- Выйдите из настроек генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.

3.3 Установка прямоугольного сигнала

- Перейдите в настройки генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.
- Выберите тип сигнала “Square” на панели “Wave” с помощью клавиш “F1-F2”.
- Установите частоту сигнала нажав клавишу “F3”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”, установка с помощью нажатия на ручку “V0”, а завершение установки с помощью выбора размерности Hz-MHz клавишами “F1-F3”.
- Установите амплитуду сигнала нажав клавишу “F4”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите постоянное смещение сигнала нажав клавишу “F5”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите форму сигнала. Для этого перейдите на страницу настроек №2 нажав клавишу “F8”. Затем включаем настройки формы сигнала “Wave param” нажав клавишу “F3” и устанавливаем требуемое значение поворотом ручки “V0”.
- Включите генератор нажав клавишу “GEN ON / GEN OFF”.
- Выйдите из настроек генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.

3.4 Установка трапециевидного сигнала

- Перейдите в настройки генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.
- Выберите тип сигнала “Trape” на панели “Wave” с помощью клавиш “F1-F2”.
- Установите частоту сигнала нажав клавишу “F3”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”, установка с помощью нажатия на ручку “V0”, а завершение установки с помощью выбора размерности Hz-MHz клавишами “F1-F3”.
- Установите амплитуду сигнала нажав клавишу “F4”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите постоянное смещение сигнала нажав клавишу “F5”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите форму сигнала. Для этого перейдите на страницу настроек №2 нажав клавишу “F8”. Затем включаем настройки формы сигнала “Wave param” нажав клавишу “F3” и устанавливаем требуемое значение поворотом ручки “V0”.
- Включите генератор нажав клавишу “GEN ON / GEN OFF”.
- Выйдите из настроек генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.

3.5 Установка постоянного сигнала

- Перейдите в настройки генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.
- Выберите тип сигнала “DC” на панели “Wave” с помощью клавиш “F1-F2”.
- Установите постоянное смещение сигнала нажав клавишу “F5”. Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Включите генератор нажав клавишу “GEN ON / GEN OFF”.
- Выйдите из настроек генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.

3.6 Установка модулированного сигнала

- Перейдите в настройки генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.
- Выберите тип сигнала “AM/FM” на панели “Wave” с помощью клавиш “F1-F2”.
- Установите частоту сигнала нажав клавишу “F3”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”, установка с помощью нажатия на ручку “V0”, а завершение установки с помощью выбора размерности Hz-MHz клавишами “F1-F3”.
- Установите амплитуду сигнала нажав клавишу “F4”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите постоянное смещение сигнала нажав клавишу “F5”. Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Установите форму сигнала. Для этого перейдите на страницу настроек №2 нажав клавишу “F8”.
Выберите вид модуляции “AM/FM” нажатием клавиши “F1”.
Установите частоту модулирующего сигнала нажав клавишу “F2”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”, установка с помощью нажатия на ручку “V0”, а завершение установки с помощью выбора размерности Hz-MHz клавишами “F1-F3”.
Установите глубину модуляции нажав клавишу “F3”.
Смена значения производится с помощью поворота ручки “V0”.
- Включите генератор нажав клавишу “GEN ON / GEN OFF”.
- Выйдите из настроек генератора нажав клавишу “GEN/DSO”.

4 Открытие сохранённых данных в MathCAD

На рис. 2 изображён листинг программы в среде MathCAD, позволяющий открыть сохранённый файл с названием «WaveData350.csv» и отобразить его в декартовой системе координат.

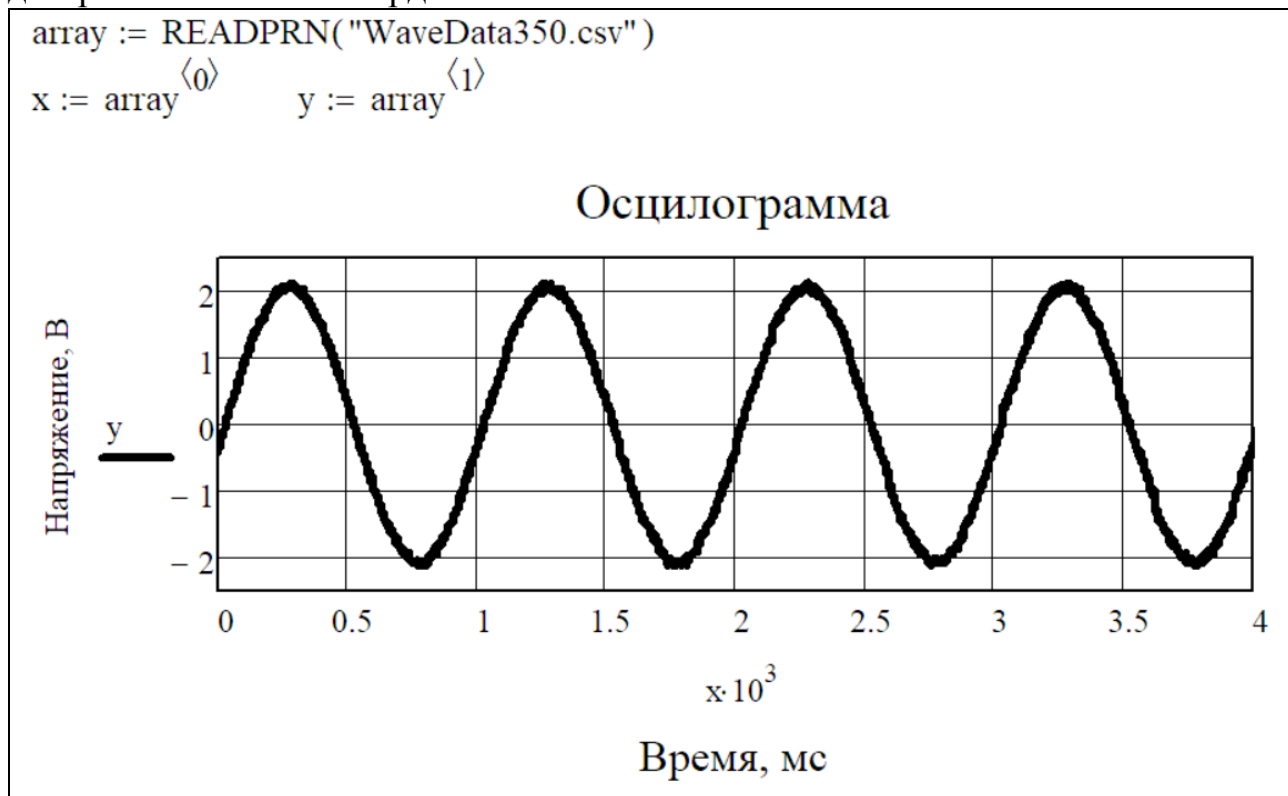


Рис. 2. Листинг программы