Министерство науки и высшего образования РФ Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «ТОМСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ» (ТУСУР) Кафедра информационной безопасности электронно-вычислительных систем (КИБЭВС)

Пехов О.В.

Электротехника

Методические указания по проведению лабораторных работ по дисциплине «Электротехника».

Томск – 2018

Пехов О.В.

Теория электрических цепей: Методические указания по проведению лабораторных работ по дисциплине «Электротехника». – Томск: 2018. – 37 с.

В сборник включены описания и методические указания к выполнению лабораторных работ по дисциплине «Электротехника» студентами направлений 10.00.00 «Информационная безопасность».

Оглавление

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1 «Исследование цепи постоянного тока
с одним источником» 4
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «Исследование разветвленной цепи
постоянного тока»
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «Исследование разветвленной цепи
переменного тока»
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «Исследование законов Ома и
Кирхгофа при гармоническом воздействии» 31
ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «Резонанс в параллельном
колебательном контуре» 44

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №1

«Исследование цепи постоянного тока с одним источником»

<u>Цель работы</u>

Экспериментальная проверка: свойств реальных источников питания; основополагающих законов электротехники (первого и второго законов Кирхгофа); правил эквивалентного преобразования электрических схем.

Описание лабораторного макета

Внешний вид лицевой панели макета со схемой электрической принципиальной приведен на рис. 1. Питание макета осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Макет содержит один источник питания с внутренним сопротивлением r_{g_H} и электродвижущей силой (э.д.с.) *Е*, которая может регулироваться с помощью соответствующего потенциометра в диапазоне от 1,5 В до 9 В, и ряд нагрузок (резисторов). Значения ЭДС по вариантам приведены в табл. 1. Значения сопротивлений нерегулируемых резисторов приведены в табл. 2, дискретно регулируемых – в табл. 3.

Таблица 1. Значения ЭДС

Вариант №	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
ЭДС, В	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7	7,5	8	8,5

Таблица 2. Значения нерегулируемых резисторов

<i>R</i> ₁ , Ом	<i>R</i> ₅ , Ом	<i>R</i> ₆ , Ом	<i>R</i> ₇ ,Ом	<i>R</i> ₈ , Ом	<i>r</i> _{вн} , Ом
1	150	150	150	150	10

Таблица 3. Значения дискретно регулируемых резисторов

Положение	Элементы										
переключателя	<i>R</i> ₂ , Ом	<i>R</i> ₃ , Ом	<i>R</i> ₄ , Ом	<i>R</i> ₉ , Ом	<i>R</i> ₁₀ , Ом	<i>R</i> ₁₁ , Ом					
1	200	300	500	100	150	60					
2	400	600	425	167	125	100					
3	340	282	362	77	231	92					
4	174	680	-	133	200	160					



Рис. 1. Макет с принципиальной электрической схемой

Трехпозиционный переключатель SA1 позволяет выбрать один из трех режимов работы макета:

– в положении "1" к источнику питания подключена правая часть схемы с резисторами *R*₇....*R*₁₁;

– в положении "xx" (холостой ход) источник отключен от нагрузок, то есть работает на холостом ходу;

в положении "2" к источнику подключена левая часть схемы с резисторами *R*₁....*R*₆.

Замечание!

<u>В ходе работы измерительные приборы используются в режиме</u> вольтметра. Неправильное включение прибора в цепь может привести к травмам и повреждению приборов.

Задание на лабораторную работу

1. Экспериментально получить внешнюю характеристику источника питания.

Внешней характеристикой называется зависимость напряжения на зажимах источника U₅₆ от тока источника I.

Величина э.д.с. *Е* задается преподавателем. Значение *Е* на макете выставлять, установив переключатель SA1 в положение "xx".

Для снятия внешней характеристики установить переключатель

SA1 в положение "1", тумблер S1 в разомкнутое положение, подключиться одним вольтметром к выходным зажимам источника (к гнездам "5" и "6"), вторым вольтметром к гнездам "7" и "9". Между этими гнездами включен резистор R_8 , служащий для измерения тока источника. Ток источника пересчитывается из измеренного напряжения на резисторе U_{R8} по закону Ома:

$$I = \frac{U_{R8}}{R_8}$$

Изменяя в возможных пределах значения сопротивлений резисторов R_{10} и R_{11} заполнить табл. 4, не менее чем для 8 точек. Рекомендуется, чтобы сумма выбранных сопротивлений R_{10} и R_{11} изменялась по нарастающей.

$R_{10} + R_{11}$, Ом	185	217			391	∞						
U_{56}, B												
U_{R8}, B												
I, мА												

Таблица 4. Результаты экспериментальных измерений

Используя данные табл. 4 построить график внешней характеристики $I(U_{56})$.

2. Рассчитать внешнюю характеристику

Расчет произвести для тех же условий, что и в предыдущем пункте программы.

Точки внешней характеристики рассчитываются по следующим соотношениям:

$$U_{56} = E - I \Box r_{6H}$$
$$U = \frac{E}{r_{6H} + R_8 + R_{10} + R_{11}}$$

Расчеты внешней характеристики занести в табл. 5, не менее чем для 8 точек.

$R_{10} + R_{11}$, Om	185	217			391	∞						
U_{56}, \mathbf{B}												
I*r _{вн} , В												
I, мА												

Таблица 5. Результаты расчетов

Построить график расчетной внешней характеристики совместно с графиком экспериментальной характеристики.

3. Проверить выполнение первого правила Кирхгофа для узла "2"

Для проведения проверки переключатель SA1 установить в положение "2" и выставить значения сопротивлений резисторов R_2 и R_4 в соответствии с номером варианта из табл. 6.

	Варианты №												
Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	
<i>R</i> ₂ , Ом	174	200	340	400	174	200	174	340	400	200	174	340	
<i>R</i> ₃ ,Ом	282	300	600	300	680	282	680	680	680	680	680	680	
<i>R</i> ₄ , Ом	500	425	362	500	425	362	500	500	500	500	362	425	
		Варианты №											
Элементы	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	
<i>R</i> ₂ , Ом	200	340	174	340	340	400	200	200	174	174	340	340	
<i>R</i> ₃ ,Ом	300	600	282	282	300	600	282	600	282	300	680	300	
<i>R</i> ₄ , Ом	500	425	425	362	362	500	500	362	362	362	362	425	
		Варианты №											
Элементы	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	
<i>R</i> ₂ , Ом	400	200	174	400	174	400	200	400	400	174	200	200	
<i>R</i> ₃ ,Ом	282	600	300	600	600	680	680	282	300	300	600	282	
<i>R</i> ₄ , Ом	500	500	500	362	425	362	362	425	425	425	425	425	
2						Вари	анть	ı №					
Элементы	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	
<i>R</i> ₂ , Ом	400	174	400	340	340	174	340	400	200	340	200	400	
<i>R</i> ₃ ,Ом	300	600	282	300	282	600	282	680	680	600	300	600	
<i>R</i> ₄ , Ом	362	500	362	500	500	362	425	425	425	500	362	425	

Таблица 6. Значения сопротивления резисторов

Для проведения измерений использовать один вольтметр. Один щуп вольтметра подключить к гнезду "2", а другой поочередно подключать к гнездам "1", "3" и "4" для измерения токов в ветвях с резисторами R_2 , R_4 и R_5 соответственно (<u>токи пересчитываются по</u> закону Ома из измеренных напряжений на резисторах).

Результаты измерений занести в табл. 7.

Таблица 7. Результаты измерений

	1							
Элемент	R_2	R_4	R_5					
Сопротивление, Ом								
Напряжение, мВ								
Ток в ветви, мА								
Алгебраическая сумма токов узла, мА								

4. Проверить выполнение первого правила Кирхгофа для узла "3"

Измерения производятся аналогично тому, как это было сделано в предыдущем пункте программы.

Результаты измерений занести в табл. 8.

Таблица 8. Результаты измерений

Элемент	R_3	R_4	R_6						
Сопротивление, Ом									
Напряжение, мВ									
Ток в ветви, мА									
Алгебраическая сумма токов узла, мА									

5. Проверить выполнение второго правила Кирхгофа для замкнутого контура на резисторах *R*₂, *R*₃, *R*₄

Измерения напряжений на резисторах производить с помощью одного вольтметра. При измерениях напряжений выбрать направление обхода замкнутого контура (по часовой стрелке либо против часовой стрелки) и переносить последовательно с элемента на элемент оба шнура вольтметра.

Результаты измерений занести в табл. 9.

Таблица 9. Результаты измерений

Элемент	R2	R3	<i>R4</i>						
Сопротивление, Ом									
Напряжение, мВ									
Алгебраическая сумма напряжений контура, мВ									

6. Проверить выполнение второго правила Кирхгофа для замкнутого контура на резисторах *R*₇...*R*₁₀

Значения сопротивлений резисторов R_9 , R_{10} и R_{11} согласно указанного преподавателем варианта взять из табл. 10.

Таблица	10.	Значения	соп	ротивле	ния	резисто	ров
		•					

Эпомонти		Вариант №												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<i>R</i> ₉ , Ом	100	167	167	133	133	100	100	77	77	133	100	167	167	133
<i>R</i> ₁₀ ,Ом	150	231	200	125	231	200	200	231	231	200	150	231	200	125
<i>R</i> ₁₁ , Ом	60	160	60	160	60	100	92	100	92	160	100	92	100	92

Продолжение таблицы 10

						E	Зариа	ант У	<u>lo</u>					
Элементы	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28
<i>R</i> ₉ , Ом	133	100	100	77	77	133	100	167	167	133	133	100	167	77
<i>R</i> ₁₀ ,Ом	231	200	200	231	231	200	150	231	200	125	231	231	150	125
<i>R</i> ₁₁ , Ом	100	60	160	60	160	92	92	100	92	100	92	160	60	160
		Вариант №												
Элементы	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
<i>R</i> ₉ , Ом	77	133	100	167	167	133	133	100	167	77	77	133	100	167
<i>R</i> ₁₀ ,Ом	200	200	150	231	200	125	231	231	150	125	200	200	125	125
<i>R</i> ₁₁ , Ом	60	100	160	60	160	60	160	92	100	92	100	60	60	160
	Вариант №													
элементы	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56
<i>R</i> ₉ , Ом	77	133	100	167	77	77	100	167	77	77	100	167	77	133
<i>R</i> ₁₀ ,Ом	150	150	231	150	125	200	231	150	125	200	125	125	150	150
<i>R</i> ₁₁ , Ом	60	160	100	92	100	92	60	160	60	160	100	92	100	92
			E	Зариа	ант У	<u>lo</u>								
Элементы	57	58	59	60	61	62	63	64						
<i>R</i> ₉ , Ом	100	167	77	133	100	167	77	133						
<i>R</i> ₁₀ ,Ом	125	125	150	150	125	125	150	150						
<i>R</i> ₁₁ , Ом	92	100	92	100	160	60	160	60						

Для проведения измерений тумблер S1 перевести во включенное состояние, переключатель SA1 перевести в положение "1". Измерение напряжений производить аналогично тому, как это выполнялось в пункте 3.5 программы.

Результаты измерений занести в табл. 11.

Таблица 11. Результаты измерений

Элемент,	R_7	R_8	R_9	R_{10}					
Сопротивление, Ом									
Напряжение, мВ									
Алгебраическая сумма напряжений контура, мВ									

7. Проверить возможность замены треугольника сопротивлений эквивалентной звездой

Выставить значения сопротивлений треугольника на элементах R_2 , R_3 , R_4 согласно табл. 12.

Элементы		Вариант №										
	1	2	3	4	5	6						
<i>R</i> ₂ , Ом	200	400	200	400	340	174						
<i>R</i> ₃ , Ом	300	300	600	600	680	282						
<i>R</i> ₄ , Ом	500	500	500	500	425	362						

Таблица 12. Значения сопротивлений резисторов

Рассчитать сопротивления эквивалентной звезды на элементах R_9 , R_{10} , R_{11} по приводимым ниже формулам:

$$R_{9} = \frac{R_{2} \Box R_{4}}{R_{2} + R_{3} + R_{4}}$$
$$R_{10} = \frac{R_{3} \Box R_{4}}{R_{2} + R_{3} + R_{4}}$$
$$R_{11} = \frac{R_{2} \Box R_{3}}{R_{2} + R_{3} + R_{4}}$$

Установить рассчитанные значения сопротивлений резисторов R_9 , R_{10} , R_{11} на макете.

Переключатель SA1 установить в положении "2" и определить токи через элементы R_5 и R_6 , замерив напряжения на этих элементах и пересчитав их в токи по закону Ома.

Перевести переключатель SA в положение «1» тумблер S1 во включенное состояние и определить токи через элементы R_7 и R_8 .

Результаты измерений занести в табл. 13.

Таблица 13. Результаты измерений

Элемент	R_5	R_7	R_6	R_8
Сопротивление, Ом				
Напряжение, мВ				
Ток, мА				

Схемы треугольника и звезды сопротивлений эквивалентны, если при замене одной фигуры на другую в оставшейся части цепи токи не изменятся. Если посмотреть на конфигурацию исследуемых здесь цепей, то с учетом равенства сопротивлений резисторов R_5 , R_6 , R_7 , R_8 эквивалентность подтвердится, если будут равны токи через резисторы R_5 и R_7 , а также через резисторы R_6 и R_8 .

8. Проверить возможность сопротивлений замены звезды эквивалентным треугольником

Выставить значения сопротивлений звезды на резисторах R_9 , R_{10} , *R*₁₁ согласно табл. 14.

Элементи		Вариант №										
Элементы	1	2	3	4	5	6						
<i>R</i> ₉ , Ом	77	133	100	77	100	167						
<i>R</i> ₁₀ , Ом	231	200	200	125	150	125						
<i>R</i> ₁₁ , Ом	92	160	160	60	60	100						

Таблица 14.

Рассчитать сопротивления эквивалентного треугольника на элементах R_2 , R_3 , R_4 по приводимым ниже формулам:

$$R_{2} = R_{9} + R_{11} + \frac{R_{9} \Box R_{11}}{R_{10}}$$
$$R_{3} = R_{10} + R_{11} + \frac{R_{10} \Box R_{11}}{R_{9}}$$
$$R_{4} = R_{9} + R_{10} + \frac{R_{9} \Box R_{10}}{R_{11}}$$

Установить рассчитанные значения сопротивлений резисторов R_2 , R_3, R_4 на макете и произвести измерения, аналогичные проведенным в пункте 7 программы. Результаты измерений занести в табл. 15.

Таблица 15. Результаты измерений

Элемент	R_5	R_7	R_6	R_8
Сопротивление, Ом				
Напряжение, мВ				
Ток, мА				

9. Сделать подробные выводы по результатам всех проведенных экспериментов

<u>Контрольные вопросы</u>

1. Дайте определения «электрическая ПОНЯТИЯМ цепь», «электрическая схема», «узел», «ветвь».

2. Сформулируйте закон Ома для участка цепи и для активной ветви.

3. Что показывает внешняя характеристика источника питания? Через какие точки она проходит?

Чем отличается внешняя характеристика реального источника 4.

питания от идеального?

- 5. Сформулируйте первое правило Кирхгофа.
- 6. Сформулируйте второе правило Кирхгофа.

7. Как осуществляется замена треугольника сопротивлений звездой и наоборот?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №2 «Исследование разветвленной цепи постоянного тока»

<u>Цель работы</u>

Экспериментальная проверка расчетов, проводимых классическими методами (контурных токов, узловых потенциалов, наложения, двух узлов), на примере разветвленной цепи с тремя источниками питания.

Описание лабораторного макета

Внешний вид лицевой панели макета со схемой электрической принципиальной приведен на рис. 1. Питание макета осуществляется от сети переменного то ка 220 В, 50 Гц.

Макет содержит три регулируемых источника питания и пять нагрузок в виде резисторов.

Напряжения источников питания регулируются с помощью потенциометров в диапазоне от 1,5 В до 9 В. Для управления режимами работы источников питания используются три переключателя SA1 ...SA3. В положении переключателя "Е" соответствующий источник включен в цепь; в положении "XX"(холостой ход) источник отключен, т.е. на его месте образуется разрыв цепи; в положении "K3" (короткое замыкание) источник отключен, а на его месте в цепи организуется «закоротка».

Значения сопротивлений резисторов приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения сопротивлений резисторов

<i>R</i> ₁ , Ом	<i>R</i> ₂ , Ом	<i>R</i> ₃ , Ом	<i>R</i> ₄ ,Ом	<i>R</i> ₅ ,Ом
300	150	150	300	200



Рис. 1. Макет с принципиальной электрической схемой

Замечание!

<u>В ходе работы измерительные приборы используются в режиме</u> вольтметра. Неправильное включение прибора в цепь может привести к травмам и повреждению приборов.



Значения электродвижущих сил (э.д.с.) источников в соответствии с выданным преподавателем номером варианта взять из табл. 2.

						В	вариа	ант Л	<u>o</u>					
Элементы	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
<i>E</i> ₁ , B	3	2	2	4	4	3	5	6	7	8	5	7	6	8
<i>E</i> ₂ , B	5	4	5	6	3	4	2	8	5	3	7	8	2	4
E_3, \mathbf{B}	7	6	6	7	5	6	8	3	2	6	2	4	3	4

Таблица 2. Значения электродвижущих сил

Для упрощения работы по расчету цепи ниже приведена система уравнений с учетом обозначений, принятых на рис. 2.

$$\begin{cases} I_{11}(R_1 + R_2) - I_{22}R_2 = E_1 - E_2 \\ -I_{11}R_2 + I_{22}(R_2 + R_3 + R_4) - I_{33}R_4 = E_2 - E_3 \\ -I_{22}R_4 + I_{33}(R_4 + R_5) = E_3 \end{cases}$$

2. Экспериментально определить токи всех ветвей

Для определения тока какой-либо ветви замерить с помощью вольтметра напряжение на соответствующем резисторе и, зная сопротивление резистора, пересчитать напряжение в ток по закону Ома:

$$I_1 = \frac{U_{R_1}}{R_1}$$

При измерениях необходимо учитывать полярность напряжений и токов, то есть каждый из двух шнуров вольтметра одинаково подключать к каждому из резисторов в соответствии с размеченными на рис. 2 направлениями токов.

Результаты измерений и расчетов из предыдущего пункта программы занести в табл. 3.

Элемент	R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Сопротивление, Ом					
Напряжение, мВ					
Ток (эксперимент), мА					
Ток (расчет), мА					

Таблица 3. Результаты измерений и расчетов

3. Рассчитать потенциалы всех узлов

Если узел 4 (рис. 2) заземлить, то неизвестными будут потенциалы двух узлов: второго и пятого. Составленная по методу узловых потенциалов система уравнений относительно указанных неизвестных приведена ниже:

$$\begin{cases} \varphi_2 \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \right) - \varphi_5 \frac{1}{R_3} = \frac{E_1}{R_1} + \frac{E_2}{R_2} \\ -\varphi_2 \frac{1}{R_3} + \varphi_5 \left(\frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) = \frac{E_3}{R_4} \end{cases}$$

4. Замерить потенциалы всех узлов

Для замера потенциалов узлов первого и пятого следует один шнур вольтметра подключить к гнезду "4" макета, а другой шнур поочередно подключать к гнездам "2" и "5".

Результаты измерений занести в табл. 4.

Таблица 4. Результаты измерений

	<i>φ</i> 2, B	φ 3, B
Расчет		
Эксперимент		

5. Проверить экспериментально выполнение второго правила Кирхгофа для контура 4, 2, 5, 4

Согласно второму правилу Кирхгофа в любом замкнутом контуре алгебраическая сумма э.д.с. равна алгебраической сумме напряжений на нагрузках. Поэтому для выполнения данного пункта программы следует замерить напряжения на зажимах источников E_2 и E_3 и напряжения на резисторах R_2 , R_3 , R_4 При измерениях необходимо учитывать полярности напряжений, приняв за направление обхода контура при проведении измерений направление контурного тока I_{22} на рис. 2 (переключаясь вольтметром с одного элемента на другой переносить оба шнура, не изменяя их последовательности).

Результаты измерений занести в табл. 5.

Таблица 5. Результаты измерений

<i>E</i> ₂ , <i>B</i>	<i>E</i> ₃ , B	Алгебраическая сумма э.д.с., В	$U_{\mathrm{R2}},\mathrm{B}$	U_{R3}, B	$U_{ m R4},{ m B}$	Алгебраическая сумма напряжений, В

6. Экспериментально проверить метод наложения

Согласно методу наложения ток в любой ветви электрической цепи равен алгебраической сумме частичных токов этой ветви. Поэтому для выполнения настоящего пункта программы требуется собрать поочередно три частичные схемы (по количеству источников в исследуемой цепи), которые приведены на рис. 3 - 5.

На макете частичные схемы создаются установкой переключателей SA1 ... SA3: одного - в положение "E", двух других - в положение "K3".



Рис. 5. Электрическая схема

Определить экспериментально частичные токи ветвей схем на рис. 3 - 5. Подсчитать истинные токи ветвей цепи как алгебраические суммы частичных токов соответствующих ветвей.

При измерениях вольтметр подключить к одному и тому же резистору на всех схемах в одной и той же полярности.

Результаты измерений и подсчетов занести в табл. 6. Таблица 6. Результаты измерений и подсчетов

		R_1	R_2	R_3	R_4	R_5
Сопротивление, Ом						
Схема на	Напряжение, В					
рис. 3	Ток, мА					
Схема на	Напряжение, В					
рис. 4	Ток, мА					
Схема на	Напряжение, В					
рис. 5	Ток, мА					
Алгебраич	ческая сумма час-					
тичных токов, мА						
Экспериментальное значение						
тока и	из табл. 3, мА					

7. Рассчитать методом двух узлов схему на рис. 6



Рис. 6. Электрическая схема

Расчетные соотношения:

$$\varphi_{2}\left(\frac{1}{R_{1}} + \frac{1}{R_{2}} + \frac{1}{R_{3} + R_{5}}\right) = \frac{E_{1}}{R_{1}} + \frac{E_{2}}{R_{2}}$$
$$I_{1} = \frac{-\varphi_{2} + E_{1}}{R_{1}}$$
$$I_{2} = \frac{-\varphi_{2} + E_{2}}{R_{2}}$$
$$I_{3} = \frac{\varphi_{2}}{R_{3} + R_{5}}$$

8. Экспериментально определить токи цепи на рис. 6

Собрать цепь по схеме на рис. 6, установив на макете переключатели SA1, SA2 в положение "E", а переключатель SA3 - в положение "XX".

Экспериментально определить потенциал узла "2" (относительно заземленного узла "4") и токи ветвей, заполнить табл. 7.

	R_1	R_2	R_3
Сопротивление, Ом			
Напряжение, мВ			
Ток, мА			
Расчетное значение тока, мА			

Таблица 7. Результат измерений

9. Сделать подробные выводы по результатам всех проведенных экспериментов

Контрольные вопросы

1. Объясните сущность метода контурных токов.

2. Дайте определение понятию «контур», какой контур называется независимым?

3. Объясните сущность метода непосредственного использования правил Кирхгофа.

4. Объясните сущность метода узловых потенциалов.

5. Объясните сущность метода наложения.

6. Объясните сущность расчета цепи методом эквивалентного генератора.

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №3 «Исследование разветвленной цепи переменного тока»

<u>Цель работы</u>

Экспериментальная проверка токораспределния в разветвленных цепях синусоидального переменного тока, содержащих активные и реактивные нагрузки (резисторы, конденсаторы, индуктивные элементы).

Описание лабораторного макета

Внешний вид лицевой панели лабораторного макета со схемой электрической принципиальной приведен на рис. 1. Питание макета осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц.

Макет содержит один источник синусоидальной электродвижущей силы (э.д.с.) *Е* и две цепи нагрузок, которые можно поочередно подключать к источнику с помощью тумблера SAI.

В качестве источника *E* используется электронный усилитель, на вход которого (на клеммы "1" и "5") подается напряжение амплитудой до одного Вольта с внешнего генератора синусоидальных колебаний. Напряжение источника E можно замерить между клеммами "1" и "4", либо клеммами "1" и "6" в зависимости от положения переключателя SA1.

Параметры нагрузок приведены в табл. 1.

1 40	лица 1. 1	Iupume ipi	n nar pyso	N			
<i>R</i> ₁ , Ом	<i>R</i> ₂ , Ом	<i>R</i> ₃ , Ом	<i>R</i> ₄ , Ом	<i>R</i> ₅ , Ом	<i>R</i> ₆ , Ом	C_1 ,	C_2 ,
						мκΦ	мкФ
220	300	150	220	150	150	1	0,47

Таблица 1. Параметры нагрузок

Параметры индуктивных элементов для каждого из макетов индивидуальны и указаны на задней стенке корпуса макета.



Рис. 1. Макет с принципиальной электрической схемой

Задание на лабораторную работу

1. Рассчитать все токи и напряжения цепи с индуктивными элементами.

Частоту источника взять из табл. 2 в соответствии с номером варианта, указанного преподавателем, действующее значение э.д.с. принять E = 1B.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота, Гц	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Вариант	10	11	12	13	14	15			
Частота, Гц	750	800	850	900	950	1000			

Таблица 2. Значения частоты источника

Расчетная схема цепи представлена на рис. 2.



Рис. 2. Расчетная схема цепи

Расчетные соотношения для комплексов действующих значений токов и напряжений:

$$\begin{split} I_{1} &= \frac{E}{R_{1}}; \quad I_{2} = \frac{E}{\sqrt{(R_{2}^{2} + (2\pi f L_{1})^{2})}}; \quad I_{3} = \frac{E}{\sqrt{(R_{3}^{2} + (2\pi f L_{2})^{2})}}; \\ U_{R2} &= I_{2}R_{2}; \quad U_{L1} = I_{2}2\pi f L_{1}; \\ U_{R3} &= I_{3}R_{3}; \quad U_{L2} = I_{3}2\pi f L_{2}; \\ \phi_{UR} &= \arctan \frac{X_{L}}{R}; \\ \phi_{UL} &= 90^{\circ} - \arctan \frac{X_{L}}{R}; \end{split}$$

Результаты занести в табл. 3 и 4.

2. Замерить напряжения на элементах цепи с катушками индуктивности.

Для выполнения данной лабораторной работы используйте программу моделирования цифровых и аналоговых схем Electronic Workbench 5.

Запустите программу и соберите схему как показано на рис. 3.

Задайте на схеме частоту источника питания и значения индуктивностей в соответствии с вашим вариантом.



Рис. 3. Электрическая схема

По умолчанию в среде EWB все измерительные приборы служат для измерения параметров цепей постоянного тока (режим DC), для корректной работы переключите вольтметр в режим измерения для цепей переменного тока (Режим AC,). Включите схему и замерьте напряжения вольтметром на всех элементах цепи. Пересчитать напряжения на резисторах в токи соответствующих ветвей по закону Ома. Например:

$$\mathbf{I}_2 = \frac{U_{R2}}{R_2};$$

Рассчитать действующие значения напряжений на всех элементах цепи. Экспериментальные и расчетные значения токов и напряжений для схемы на рис. 2 занести в табл. 3 и табл. 4.

		Напряжение на элементах					
			<i>U</i> _{R2} , мВ	U_{R3} ,	$U_{\rm L1}$,	$U_{\rm L2}$,	
		мВ		мВ	мВ	мВ	
Расчет	Действующее						
	значение						
Эксперимент	Действующее						
	значение						

Таблица 3. Экспериментальные и расчетные значения напряжений

			жи вет	твей			
		I ₁ ,	I ₂ ,	I ₃ , мА	\mathbf{R}_{1} ,	R ₂ ,	R ₃ ,
		мА	мА		Ом	Ом	Ом
Расчет	Действующее						
	значение				220	200	150
Эксперимент	Действующее				220	500	150
	значение						

3. Замерить фазовые сдвиги между синусоидами токов и напряжений.

Чтобы измерить сдвиг фаз в цепи необходимо воспользоваться двухканальным осциллографом. Подключить осциллограф к цепи как показано на рис. 3, и замерить фазовый сдвиг между током и напряжением на элементе R_2 . Затем, пользуясь тем, что сумма острых углов в прямоугольном треугольнике равна 90°, найдите фазовый сдвиг на индуктивном элементе.

Чтобы измерить сдвиг фаз в цепи необходимо воспользоваться двухканальным осциллографом. Для измерения сдвига фаз на резисторе используется схема, изображенная на рис. 3. По ней канал А осциллографа (красный провод) подключен ко входу схемы (непосредственно к источнику питания). Канал В осциллографа (черный провод) подключен между резистором и катушкой индуктивности.

Включите схему. Дважды кликните по изображению

осциллографа откроется окно с осциллограммой. Остановите моделирование, при этом у вас должно получиться изображение аналогичное рис. 4. Красной синусоидой обозначен сигнал, снимаемый со входа схемы.



Рис. 4. Осциллограмма

Сдвиг фаз показывает взаимное расположение двух колебательных процессов во времени. Но его измеряют не в единицах времени (которые откладываются по горизонтальной оси), а в долях периода сигнала (т.е. в единицах угла). В этом случае одинаковому взаимному расположению сигналов будет соответствовать одинаковый фазовый сдвиг, независимо от периода и частоты сигналов (т.е. независимо от реального масштаба графиков по оси времени). Поэтому наибольшая точность измерений получается, если растянуть период сигнала на весь экран.

Поскольку напряжение измеряется между двумя точками, то вход осциллографа имеет две клеммы. Причем они не равнозначны. Одна клемма, называемая «фаза», подключена ко входу усилителя вертикального отклонения луча. Вторая клемма – «земля» или «корпус». Она называется так потому, что электрически соединена с корпусом прибора (это общая точка всех его электронных схем). Осциллограф показывает напряжение фазы по отношению к земле.

Очень важно знать, какой из входных проводников является фазой. В импортных приборах обычно используются специализированные щупы, земля которых имеет зажим типа «крокодил» так как часто подключается к корпусу исследуемого устройства, а фаза оканчивается либо «иголкой», которой можно удобно и надежно «воткнуться» даже в контакт маленького размера, либо зажимом (рис. 5). В этом случае перепутать фазу и корпус в принципе невозможно.



Рис. 5. Специализированные щуп

Осциллографы бывают аналоговыми и цифровыми. В цифровых приборах имеется возможность подсветить сигналы на разных каналах разным цветом, для удобства идентификации. Но поскольку в аналоговом осциллографе графики сигнала обоих каналов имеют одинаковый цвет и одинаковую яркость, то для того, чтобы их различать между собой, рекомендуется сделать их разной амплитуды. При этом напряжение, измеряемое каналом А (входным) прибора, лучше делать большим – в этом случае синхронизация будет лучше «держать» изображение. Подготовка к измерениям производится так:

1. Ручками обоих каналов их линии развертки устанавливаются на среднюю линию сетки экрана (при отсутствии сигналов на входах).

2. Ручками регулировки усиления каналов вертикального отклонения (ступенчато и плавно) сигнал 1-го канала устанавливается большой амплитуды, а 2-го канала – меньшей амплитуды.

3. Ручками регулировки скорости развертки устанавливается такая ее скорость, чтобы на экране отображался примерно один период сигнала.

4. Ручкой «Уровень синхронизации» добиваются того, чтобы график напряжения начинался с оси времени (с линии развертки).

5. Ручкой - добиваются того, чтобы график напряжения начинался с крайней левой вертикальной линии сетки экрана.

6. Ручками «Скорость развертки» (ступенчато и плавно) добиваются того, чтобы период графика напряжения заканчивался на крайней правой вертикальной линии сетки экрана.

7. Повторяют пункты 4...6 до тех пор, пока период графика напряжения не будет растянут на весь экран, причем его начало и конец должны совпадать с линией развертки (рис. 4).

Прежде, чем измерять величину сдвига фаз, необходимо определить, какой из сигналов опережает, а какой отстает. От этого зависит знак угла сдвига фаз φ . На рис. 4 график черного цвета отстает от красного – начало его периода расположено во времени позже, чем начало периода красного. Этой ситуации соответствуют положительные значения угла сдвига фаз. Если начало периода тока на экране не отображается, то сравниваются окончания первого полупериода: первым к нулю вернется тот график, который начался раньше. Угол сдвига фаз при этом отрицателен.

Модуль угла сдвига фаз φ это расстояние между началами или между концами периода (положительного полупериода) сигналов в делениях сетки экрана. Далее значение модуля φ находится из пропорции, учитывая, что один полный период любого колебания равен 360 градусов.

Чтобы определить значение фазового сдвига в градусах рассчитайте период вашего сигнала и подставьте значения в формулу:

$$\varphi = \frac{360^{\circ} (T2 - T1)}{T}$$

В цифровом осциллографе процедура несколько проще. Выставьте амплитуду наиболее удобную для наблюдения на каждом канале осциллографа. С помощью шкалы временной развертки добейтесь наиболее удобного для анализа вида сигналов. Переместите визир «1» в точку пересечения первой синусоиды с осью симметрии. Переместите визир «2» в, ближайшую по отношению к первому визиру, точку пересечения второй синусоиды. В правом информационном окне в поле $T_2 - T_1$ показано значение задержки между будет сигналами В микросекундах. Фазовый сдвиг на индуктивности вычисляется по формуле:

$$\phi_L = 90^\circ - \phi_R;$$

Подключите осциллограф аналогичным образом, чтобы провести измерения на ветви с элементами R_3 и L_2 .

Результаты измерений занести в табл. 5.

Таблица 5. Результаты измерений

	ϕ_{R2}°	ϕ_{L1}°	φ _{R3} °	ϕ_{L2}°
Расчет				
Эксперимент				

4. Построить векторную диаграмму цепи, показанной на рис. 2.

Для построения векторной диаграммы токов и напряжений использовать расчетные данные из п.1 программы. На рисунке с диаграммами указать масштабы токов и напряжений.

5. Рассчитать все токи и напряжения цепи с конденсаторами.

Частоту источника *f* взять из табл. 6.

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота, Гц	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300
Вариант	10	11	12	13	14	15			
Частота, Гц	1400	1500	250	300	350	450			

Таблица 6. Значение частоты источника

Расчетная схема цепи приведена на рис. 6



Рис. 6. Расчетная схема цепи

Расчетные соотношения для комплексов действующих значений токов и напряжений:

$$\begin{split} I_4 = \frac{E}{R_4}; \quad I_5 = \frac{E}{\sqrt{(R_5^2 + (\frac{1}{2\pi f C_1})^2)}}; \quad I_6 = \frac{E}{\sqrt{(R_6^2 + (\frac{1}{2\pi f C_2})^2)}}; \\ U_{R5} = I_5 R_5; \quad U_{C1} = I_5 \frac{1}{2\pi f C_1}; \\ U_{R6} = I_6 R_6; \quad U_{C2} = I_6 \frac{1}{2\pi f C_2}; \\ \phi_{UR} = arctg \frac{Xc}{R}; \\ \phi_{UC} = 90^\circ - arctg \frac{X_C}{R}; \end{split}$$

Результаты занести в табл. 7 и 8.

		Напряжение на элементах						
		U_{R5} ,	<i>U</i> _{R6} , мВ	$U_{\mathrm{R7}},$	$U_{\rm C1}$,	$U_{\rm C2}$,		
		мВ		мВ	мВ	мВ		
Расчет	Действующее							
	значение							
Эксперимент	Действующее							
	значение							

Таблица 7. Экспериментальные и расчетные значения напряжений

Таблица 8. Экспериментальные и	расчетные значения токов
--------------------------------	--------------------------

		To	жи вет	твей			
		I_5 ,	I_6 ,	<i>I</i> ₇ , мА	R_5 ,	R_6 ,	R_7 ,
		мА	мА		Ом	Ом	Ом
Расчет	Действующее						
	значение				220	150	150
Эксперимент	Действующее				220	130	130
	значение						

6. Перевести на схеме тумблер SA1 в положение «2» и выполнить для цепи с конденсаторами все пункты программы экспериментальных исследований, проведенных ранее для цепи с индуктивными элементами. Замерить фазовые сдвиги между синусоидами токов и напряжений.

Подключить осциллограф к цепи как показано на рис. 7, и замерить фазовый сдвиг между током и напряжением на элементе C1. Затем, пользуясь тем, что сумма острых углов в прямоугольном треугольнике равна 90°, найдите фазовый сдвиг на резисторе R_5 .

Подключите осциллограф аналогичным образом, чтобы провести измерения на ветви с элементами R_6 и C_2 .

Результаты измерений занести в табл. 9.

Таблица 9. Результаты измерений

	ϕ_{R5}°	Φ_{C1}°	ϕ_{R6}°	Φ_{C2}°
Расчет				
Эксперимент				



Рис. 7. Электрическая схема

7. Построить векторную диаграмму цепи, показанной на рис. 6.

Для построения векторной диаграммы токов и напряжений использовать расчетные данные из п.1 программы. На рисунке с диаграммами указать масштабы токов и напряжений.

8. Сделать итоговые выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома для электрических цепей переменного тока. Для каких величин он соблюдается?

2. Сформулируйте правила Кирхгофа для электрических цепей переменного тока. Для каких значений электрических величин они выполняются?

3. Какие способы представления гармонических функций вы знаете? Дайте им краткую характеристику. Как найти среднее и действующее значения электрической величины?

4. Гармонический ток в активном сопротивлении (мощность, сила тока, напряжение). Каковы фазовые соотношения между напряжением и током в сопротивлении?

5. Гармонический ток в индуктивности (мощность, сила тока, сопротивление, напряжение, энергия). Каковы фазовые соотношения между напряжением и током в индуктивности? Как изменяется сопротивление индуктивного элемента с ростом частоты?

6. Гармонический ток в ёмкости (мощность, сила тока, сопротивление, напряжение, энергия). Каковы фазовые соотношения между

напряжением и током в емкости? Как изменяется сопротивление емкостного элемента с ростом частоты?

7. Как осуществляется построение векторной диаграммы для цепи переменного тока при последовательном соединении элементов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №4 «Исследование законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии»

<u>Цель работы</u>

Освоение методов измерения напряжения, тока и разности фаз гармонических сигналов; экспериментальная проверка топологических уравнений цепей первого порядка и закона Ома в комплексной форме для индуктивности *L* и емкости *C*.

Описание лабораторного макета

Лабораторная установка состоит из лабораторного макета и измерительного блока. Лабораторный макет включает генератор сигналов низкой частоты и панели «Законы Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии». Внешний вид макета представлен на рис. 1.



Рис.1. Макет «Законы Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии»

Технические характеристики генератора сигналов низкой частоты (генератора ЭДС):

- Диапазон частот 50Гц...1,5КГц;
- Выходное напряжение 0...2В ампл.;
- Выходное сопротивление 10Ом;

Форма сигнала – гармоническая или последовательность прямоугольных импульсов (устанавливается переключателем «форма сигнала»).

Питание макета осуществляется от сети переменного тока 220В 50Гц.

Внешний вид измерительного блока представлен на рис. 2. Он содержит мультиметры UT50C, UT50D и фазометр. Мультиметры предназначены для измерения частоты, напряжения, сопротивления, индуктивности емкости. Питание измерительного И блока осуществляется от лабораторного макета с помощью девятиконтактного плоского кабеля, подключаемого через внешние разъемы ЭТИХ устройств.



Рис. 2. Измерительный блок

В ходе работы контролируйте режим работы измерительного прибора в соответствии с заданием. Неправильное включение прибора в цепь может привести к травмам и повреждению приборов.

В лабораторной работе также используется программное

обеспечение для схемотехнического моделирования.

Большинство измерительных приборов предназначены ДЛЯ измерения узлового напряжения. Один из выводов приборов заземлен, часто его называют общим проводом. Второй вывод называют потенциальным или сигнальным, или просто обозначают «вход» или «выход». При сборке измерительной установки в первую очередь общие соединяются между собой провода всех приборов И исследуемого объекта.

Фазометр служит для измерения разности начальных фаз двух узловых гармонических напряжений. Если вход фазометра «Опорный» подключить ко входу исследуемой цепи, а вход «Сигнал» – к выходу цепи, то фазометр покажет разность начальных фаз: $\varphi = \varphi_{U_{6bx}} - \varphi_{U_{6x}}$. Вместо фазометра в данной работе предлагается использовать осциллограф - прибор, показывающий форму напряжения во времени. Также он позволяет измерять ряд параметров сигнала, такие как напряжение, ток, частота, угол сдвига фаз. Но главная польза от осциллографа – возможность наблюдения формы сигнала. Во многих случаях именно форма сигнала позволяет определить, что именно происходит в цепи.



Рис. 3. Электрические схемы

Для удобства измерения напряжений на элементах, каждая ветвь макета содержит пару одинаковых резисторов R_{1-1} и R_{1-2} номиналом 1кОм (рис. 3)

Особенности измерения рассмотрим на примере *RL*-ветви.

Если вывод 2 схемы соединить с сигнальной шиной \rightarrow), а вывод 4 соединить с общим проводом, то получим схему измерения напряжения на резисторе R_{1-2} , (рис. 4.а). А если к сигнальной шине подключить вывод 1, а вывод 3 «заземлить», то получим схему измерения напряжения на индуктивности (рис. 4.б).



Рис. 4. Схемы измерения напряжения на резисторе R_{1-2} (а) и индуктивности (б)

Задание на лабораторную работу

В работе исследуются соотношения между напряжениями и током в последовательном соединении *RL*, *RC* и *RR* (рис. 5).



Рис. 5. Схемы последовательных соединений элементов

Параметры элементов R = 1кОм, $L = 0,3\Gamma$ н, C = 0,33мкФ. Действующее значение напряжения на выходе генератора 1 вольт. Частоту источника сигнала взять из табл. 1 в соответствии с вариантом, указанным преподавателем

1		-							
Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Частота, Гц	300	350	400	450	500	550	600	650	700
Вариант	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Частота, Гц	750	800	850	900	950	1000	1100	1200	1300

Таблица1. Значения частоты источника сигнала

1. Домашняя самоподготовка

По лекционным материалам и методическим указаниям к данной работе изучить:

– соотношения между током и напряжением на элементах *R*, *L*, *C* (комплексные уравнения) для мгновенных значений и при гармоническом воздействии;

- основы метода комплексных амплитуд;

- законы Ома и Кирхгофа в комплексной форме;

– методику и схемы измерения действующего значения и начальной фаза напряжения и тока;

– подготовить расчеты по приведенным соотношениям для каждого пункта работы.

2. Исследовать выполнение законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии для последовательного соединения катушки индуктивности *L* и резистора *R*₁.

Рассчитать ток и напряжение на элементах *RL*-цепи. Расчетная схема, обозначения элементов и условно положительные направления напряжений и тока представлены на рис. 5.а. Начальную фазу напряжения \mathring{U}_{BX} принять равной нулю. Результаты расчета занести в табл. 2.

Таблица 2. Последовательное соединение *RL*. Частота $f = ___{\text{Fu}}$, $U_{\text{BX}} = 1$ В

	U _{R1} , B	ϕ_{UR}°	$U_{\rm L}, \mathbf{B}$	φ _{UL} °	<i>I</i> , мА	φı°	<i>R</i> ₁ , Ом	<i>L</i> , Гн
Расчет							1000	0,3
Эксперимент							1000	0,3

Расчетные соотношения:

$$\begin{split} & \omega = 2\pi f; & X_L = \omega L; \\ & Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}; & I = \frac{U}{Z}; \\ & U_R = I \Box R; & U_L = I \Box X_L; \\ & \phi_{UR} = arctg \, \frac{X_L}{R}; & \phi_I = \phi_{UR}; \\ & \phi_{UL} = 90^\circ - arctg \, \frac{X_L}{R}; \end{split}$$

Эксперимент 1.

Измерить значения напряжений и начальных фаз (комплексные напряжения) на элементах последовательного соединения катушки индуктивности L и резистора R_1 рис. 5.а. Схема измерения модуля и фазы представлена на рис. 6.



Рис. 6. Схема измерения модуля и фазы

Сборка измерительной установки для *RL*-цепи:

Для выполнения данной лабораторной работы используйте программу моделирования цифровых и аналоговых схем Electronic Workbench 5.

Запустите программу и соберите схему, изображенную на рис. 7.



Рис. 7. Электрическая схема

Задайте на схеме частоту источника питания в соответствии с вашим вариантом.

Для измерения напряжения на резисторе в *R-L*-цепочке подключите вольтметр как показано на рис. 7. По умолчанию в среде EWB все измерительные приборы служат для измерения параметров цепей постоянного тока (режим DC), для корректной работы переключите вольтметр в режим измерения для цепей переменного тока (Режим AC, (как на рис.)). Включите схему на моделирование и запишите в табл. показания напряжения.

Для измерения напряжения на катушке индуктивности в *R-L*цепочке подключите вольтметр параллельно катушке индуктивности, включите схему на моделирование и запишите в таблицу показания напряжения.

Чтобы измерить сдвиг фаз в цепи необходимо воспользоваться двухканальным осциллографом. Для измерения сдвига фаз на катушке индуктивности используется схема, изображенная на рис. 7. По ней канал А осциллографа (красный провод) подключен ко входу схемы (непосредственно к источнику питания). Канал В осциллографа (черный провод) подключен между резистором и катушкой индуктивности.

Сдвиг фаз показывает взаимное расположение двух колебательных процессов во времени. Но его измеряют не в единицах времени (которые откладываются по горизонтальной оси), а в долях периода сигнала (т.е. в единицах угла). В этом случае одинаковому взаимному расположению сигналов будет соответствовать одинаковый фазовый сдвиг, независимо от периода и частоты сигналов (т.е. независимо от реального масштаба графиков по оси времени). Поэтому наибольшая точность измерений получается, если растянуть период сигнала на весь экран.

Осциллографы бывают аналоговыми и цифровыми. В цифровых приборах имеется возможность подсветить сигналы на разных каналах разным цветом, для удобства идентификации. Но поскольку в аналоговом осциллографе графики сигнала обоих каналов имеют одинаковый цвет и одинаковую яркость, то для того, чтобы их различать между собой, рекомендуется сделать их разной амплитуды. При этом напряжение, измеряемое каналом А (входным) прибора, лучше делать большим – в этом случае синхронизация будет лучше «держать» изображение. Подготовка к измерениям производится так:

1. Ручками обоих каналов их линии развертки устанавливаются на среднюю линию сетки экрана (при отсутствии сигналов на входах).

2. Ручками регулировки усиления каналов вертикального отклонения (ступенчато и плавно) сигнал 1-го канала устанавливается большой амплитуды, а 2-го канала – меньшей амплитуды.

3. Ручками регулировки скорости развертки устанавливается такая ее скорость, чтобы на экране отображался примерно один период сигнала.

4. Ручкой «Уровень синхронизации» добиваются того, чтобы график напряжения начинался с оси времени (с линии развертки).

5. Ручкой - добиваются того, чтобы график напряжения начинался с крайней левой вертикальной линии сетки экрана.

6. Ручками «Скорость развертки» (ступенчато и плавно) добиваются того, чтобы период графика напряжения заканчивался на крайней правой вертикальной линии сетки экрана.

7. Повторяют пункты 4...6 до тех пор, пока период графика напряжения не будет растянут на весь экран, причем его начало и конец должны совпадать с линией развертки (рис. 8).

Прежде, чем измерять величину сдвига фаз, необходимо определить, какой из сигналов опережает, а какой отстает. От этого зависит знак угла сдвига фаз φ . На рис. 8 график черного цвета отстает от красного – начало его периода расположено во времени позже, чем начало периода красного. Этой ситуации соответствуют положительные значения угла сдвига фаз. Если начало периода тока на экране не отображается, то сравниваются окончания первого полупериода: первым к нулю вернется тот график, который начался раньше. Угол сдвига фаз при этом отрицателен.

Модуль угла сдвига фаз φ это расстояние между началами или между концами периода (положительного полупериода) сигналов в делениях сетки экрана. Далее значение модуля φ находится из пропорции, учитывая, что один полный период любого колебания равен 360 градусов.

Чтобы определить значение фазового сдвига в градусах рассчитайте период вашего сигнала и подставьте значения в формулу:

$$\varphi = \frac{360^{\circ} \square (T_2 - T_1)}{T}$$

В цифровом осциллографе процедура несколько проще. Выставьте амплитуду наиболее удобную для наблюдения на каждом канале осциллографа. С помощью шкалы временной развертки добейтесь наиболее удобного для анализа вида сигналов. Переместите визир «1» в точку пересечения первой синусоиды с осью симметрии. Переместите визир «2» в, ближайшую по отношению к первому визиру, точку пересечения второй синусоиды. В правом информационном окне в поле $T_2 - T_1$ будет показано значение задержки между сигналами в микросекундах.



Временная развертка

Рис. 8. Осциллограмма

Выполнение работы на реальном макете

 Соединить нулевые провода генератора и обоих мультиметров с шиной ⊥ панели (рис. 6).

– Переключатель «форма сигнала» генератора низкой частоты установить в положение «~», выход генератора подключить к сигнальной шине \rightarrow) панели. К этой же шине подключить вход мультиметра UT50C, переведенного в режим измерения частоты *f*, и вход мультиметра UT50D, установленного в режим измерения переменного напряжения.

– Включить питание макета, установить заданную частоту *f* и напряжение порядка 1В. Измерительная установка к работе готова.

Измерить модуль и начальную фазу напряжения на индуктивности рис. 5.а. Для этого:

– Соединить перемычкой гнездо 3 с шиной ⊥ (т.е. «заземлить» свободный вывод катушки индуктивности);

– Соединить перемычкой гнездо 1 этой же схемы с шиной →);

Отсоединить вход мультиметра UT50D от сигнальной шины
 →) и подсоединить его к гнезду 2. Вольтметр покажет напряжение на индуктивности.

– Подключить канал А осциллографа к гнезду шины →). Поскольку напряжение измеряется между двумя точками, то вход осциллографа имеет две клеммы. Причем они не равнозначны. Одна клемма, называемая «фаза», подключена ко входу усилителя вертикального отклонения луча. Вторая клемма – «земля» или «корпус». Она называется так потому, что электрически соединена с корпусом прибора (это общая точка всех его электронных схем). Осциллограф показывает напряжение фазы по отношению к земле.

Очень важно знать, какой из входных проводников является импортных приборах обычно фазой. B используются специализированные щупы, земля которых имеет зажим типа «крокодил» так как часто подключается к корпусу исследуемого устройства, а фаза оканчивается либо «иголкой», которой можно удобно и надежно «воткнуться» даже в контакт маленького размера, либо зажимом (рис. 9). В этом случае перепутать фазу и корпус в принципе невозможно.



Рис. 9. Специализированные щуп

Измеренные значения напряжения *UL* и начальной фазы *фUL* занести в табл. 2.

Эксперимент 2.

Измерить модуль и начальную фазу напряжения на сопротивлении *R*₁. схема измерения представлена на рис. 10.



Рис. 10. Схема измерения

Сборка измерительной установки для *LR*-цепи:

Для выполнения этого шага измените расположение резистора R_{1-1} и катушки индуктивности как показано на рис. 11.



Рис. 11. Электрическая схема

С помощью вольтметра измерьте значения напряжения на катушке индуктивности и резисторе. Сравните полученные значения, с записанными ранее. Какой вывод вы можете сделать? По аналогии с предыдущим шагом определите сдвиг фаз на резисторе R_{1-1} , результаты запишите в таблицу.

Выполнение работы на реальном макете

Для измерения напряжения и сдвига фаз на сопротивлении R_{1-1} на реальном макете достаточно поменять в схеме на рис. 6 местами выводы 3 и 1 RL-цепочки:

Гнездо 4 соединить перемычкой с шиной ⊥, а гнездо 2 соединить перемычкой с сигнальной шиной →) (рисунок 4).

Вольтметр и осциллограф зафиксируют соответственно модуль и начальную фазу напряжения на сопротивлении *R*₁. Показания приборов:

а) занести в табл. 2;

б) использовать для вычисления модуля и начальной фазы тока. Вычисленные величины так же занести в табл. 2.

Используя измеренные величины, вычислить индуктивность *L*, построить топографическую векторную диаграмму напряжений («треугольник напряжений») и лучевую диаграмму тока. Начало координат тока и напряжения совместить. Масштаб напряжения 0,2 в/см, масштаб тока 0,1 мА/см.

Сделать выводы о выполнении закона Кирхгофа в комплексной форме и закона Ома для индуктивности.

3. Исследовать выполнение законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии для последовательного соединения катушки конденсатора С и резистора *R*₁.

Рассчитать ток и напряжение на элементах *RC*-цепи.

Расчетная схема, обозначения элементов и условно

положительные направления напряжений и тока представлены на рисунке 5.б. Начальную фазу напряжения *Й***вх** принять равной нулю.

Результаты расчета занести в табл. 3.

Таблица 3. Последовательное соединение *RC*. Частота $f = ___{\Gamma_{u}}$, $U_{\text{вх}} = 1$ В

	U _{R1} , B	ϕ_{UR}°	<i>U</i> _C , B	φ _{UC} °	І, мА	φı°	<i>R</i> ₁ , Ом	С, мкФ
Расчет							1000	0,33
Эксперимент							1000	0,33

Расчетные соотношения:

$$\begin{split} & \omega = 2\pi f \,; & X_C = \frac{1}{\omega C} \,; \\ & Z = \sqrt{R^2 + X_C^2} \,; & I = \frac{U}{Z} \,; \\ & U_R = I \Box R \,; & U_C = I \Box X_C \,; \\ & \phi_{UR} = \arctan \frac{X_C}{R} \,; & \phi_I = \phi_{UR} \end{split}$$

Выполнить для *RC*-цепи все пункты программы измерений, аналогично проведенным ранее для *RL*-цепи. По результатам измерений рассчитать емкость С и построить векторные диаграммы напряжений и тока, убедиться в выполнении закона Кирхгофа и закона Ома в комплексной форме.

4. Исследовать выполнение законов Ома и Кирхгофа при гармоническом воздействии для последовательного соединения сопротивления *R*₁ и *R*₃.

Рассчитать ток и напряжение на элементах *RR*-цепи.

Расчетная схема, обозначения элементов и условно положительные направления напряжений и тока представлены на рис. 5.в. Сопротивления $R_1 = R_3 = 1$ кОм. Начальную фазу напряжения *Ů***вх** принять равной нулю.

Результаты расчета занести в табл. 4.

Таблица 4. Последовательное соединение *RR*. Частота $f = ____{\text{вх}} \Gamma$ ц, $U_{\text{вх}} = 1$ В

	U _{R1} , B	φ _{ur} °	$U_{\rm C}, {\rm B}$	φ _{UC} °	<i>I</i> , мА	φı°	<i>R</i> ₁ , Ом	<i>R</i> ₃ , Ом
Расчет							1000	1000
Эксперимент							1000	1000

Расчетные соотношения:

$$U_{R1} = U_{ex} \frac{R1}{R1 + R3}; \quad U_{R3} = U_{ex} \frac{R3}{R1 + R3};$$
$$I = \frac{U_{ex}}{R1 + R3}; \quad \phi_I = \phi_{UR1} = \phi_{UR3} = 0;$$

Выполнить для RR-цепи все пункты программы измерений, аналогично проделанным для RL-цепи. Построить векторные диаграммы напряжений и тока, убедиться в выполнении закона Кирхгофа и закона Ома в комплексной форме.

5. Сделать итоговые выводы по результатам работы.

Контрольные вопросы

1. Сформулируйте закон Ома для электрических цепей переменного тока. Для каких величин он соблюдается?

2. Сформулируйте правила Кирхгофа для электрических цепей переменного тока. Для каких значений электрических величин они выполняются?

3. Какие способы представления гармонических функций вы знаете? Дайте им краткую характеристику. Как найти среднее и действующее значения электрической величины?

4. Гармонический ток в активном сопротивлении (мощность, сила тока, напряжение). Каковы фазовые соотношения между напряжением и током в сопротивлении?

5. Гармонический ток в индуктивности (мощность, сила тока, сопротивление, напряжение, энергия). Каковы фазовые соотношения между напряжением и током в индуктивности? Как изменяется сопротивление индуктивного элемента с ростом частоты?

6. Гармонический ток в ёмкости (мощность, сила тока, сопротивление, напряжение, энергия). Каковы фазовые соотношения между напряжением и током в емкости? Как изменяется сопротивление емкостного элемента с ростом частоты?

7. Как осуществляется построение векторной диаграммы для цепи переменного тока при последовательном соединении элементов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №5 «Резонанс в параллельном колебательном контуре»

Цель работы

Целью лабораторной работы является определение параметров параллельного колебательного контура и изучение явления резонанса напряжений. В настоящей работе исследуется цепь, в которой реактивные элементы (конденсатор и индуктивная катушка) включены в параллельных ветвях. При резонансе в такой цепи потребляемый от источника ток имеет минимальное значение, а в каждой из параллельных ветвей с реактивными элементами ток может превышать значение тока, потребляемого от источника.

Описание лабораторного макета

Лабораторная установка состоит из лабораторного макета «Резонанс в параллельном колебательном контуре», измерительного блока, генератора и осциллографа. Внешний вид лицевой панели лабораторного макета со схемой электрической принципиальной приведен на рис. 1. Питание макета осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц.



Рис. 1. Резонанс в параллельном колебательном контуре».

Макет содержит источник синусоидальной электродвижущей силы (э.д.с.) E и цепь нагрузки. Сопротивление резистора $R_3 = 10$ Ом. Параметры остальных нагрузок можно дискретно изменять с помощью пакетных переключателей. Значения параметров нагрузок приведены в табл. 1.

Элементы	Положения соответствующего переключателя								
	1	1 2 3							
С, мкФ	0,4	0,5	0,66	1					
<i>L</i> , мкГн	1360	2720	4800	5440					
<i>R</i> ₁ , Ом	1	2	3	4					
<i>R</i> ₂ , Ом	1	2	3	4					

Таблица 1. Значения параметров нагрузок

Источник *E* управляется от внешнего генератора, который подсоединяется к гнездам "1" и "2" макета (к гнездам, расположенным вертикально рядом с символом («~»). Значение амплитуды снимаемого с генератора сигнала не должно превышать 1,5 В. В качестве внешнего генератора предлагается использовать генератор сигналов UNI-T UTG9002C.

В ходе работы контролируйте режим работы измерительного прибора в соответствии с заданием. Неправильное включение прибора в цепь может привести к травмам и повреждению приборов.

Данную лабораторную работу можно выполнить и с использованием программного обеспечения NI Multisim. При этом в качестве основного измерительного инструмента необходимо использовать графопостроитель (Bode Plotter) (рис. 2).



Рис. 2. Инструмент графопостроитель и его панель управления

Задание на лабораторную работу

1. Рассчитать основные характеристики резонансного контура

Исходные данные в соответствии с номером варианта взять из табл. 2. Сопротивление резистора R_1 и R_2 принять 1 Ом, действующее значение э.д.с. генератора установить порядка E = 1 В.

Таблица 2. Исходные данные

Элементы	Вариант №										
	1	1 2 3 4 5 6 7 8									
L, мкГн	1360	2720	4800	5440	1360	2720	4800	5440			
С, мкФ	0,4	0,5	0,66	1	1	0,66	0,4	0,5			

Основные расчетные соотношения (для случая $R_1 << \rho, R_2 << \rho$):

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$
 - резонансная частота;
 $f_{\mu} = \frac{f_0}{2Q}(\sqrt{1+4Q^2} - 1)$ - нижняя граница полосы пропускания;
 $f_e = \frac{f_0}{2Q}(\sqrt{1+4Q^2} + 1)$ - верхняя граница полосы пропускания;
 $\Pi = f_e - f_{\mu} = \frac{f_0}{Q}$ - полоса пропускания;
 $Q = \frac{R_p}{\rho}$ - добротность;
 $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ - характеристическое сопротивление;
 $R_p = \frac{\rho^2}{R_1 + R_2}$ - эффективное сопротивление контура;
 $I_{Lp} = I_{Cp} = QI_p$ - токи (действующие значения) через индуктивный
элементе и конденсатор при резонансе;

 $I_p = \frac{E_m}{\sqrt{2}(R_p + R_3)}$ - действующее значение тока потребляемого от

источника при резонансе;

$$\phi = arctg \frac{2\pi fC - \frac{1}{2\pi fL}}{R_3}$$
 - фазовый сдвиг на заданной частоте.

2. Построить экспериментальную амплитудную частотную характеристику (АЧХ)

Установить на макете с помощью пакетных переключателей заданные значения параметров элементов и подключить осциллограф, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Схема подключения измерительных приборов

АЧХ является основной характеристикой резонансной цепи и показывает зависимость тока в цепи I от частоты f, или, в относительных единицах, зависимость $\frac{I}{I_p}$ от f.

Но с другой стороны, напряжение на резисторе R_3 пропорционально току *I*, а величина *E*, как и ток при резонансе I_p , не изменяется с варьированием частоты. Таким образом, зависимость $\frac{U_{R3}}{E}$ от *f* полностью повторяет зависимость $\frac{I}{I_p}$ от *f*. Поэтому на схеме на

один канал осциллографа подано напряжение источника (с гнезд «1» и «2»), а на другой – напряжение на резисторе R_3 (с гнезд «2» и «5»).

С помощью осциллографа можно наблюдать, как на частоте резонанса осциллограммы напряжений на входе цепи и на резисторе R₃ фазе, но амплитуда напряжений на резисторе совпадают ПО существенно меньше. При уменьшении частоты от резонансной можно наблюдать как осциллограмма напряжений на резисторе начинает увеличиваться по амплитуде, и смещаться правее относительно входного напряжения. При увеличении частоты от резонансной можно наблюдать как осциллограмма напряжений на резисторе начинает увеличиваться по амплитуде, и смещаться левее относительно входного напряжения. Построить АЧХ можно сняв несколько точек с экрана осциллографа и найдя их отношение $\frac{U_{R3}}{E}$ при заданных частотах. Но проще воспользоваться графопостроителем в среде Multisim. Для этого необходимо установить диапазон сканирования частоты плоттера таким

образом, чтобы в него попала резонансная частота, определенная расчетным путем. Затем экспериментально подобрать верхнее значение частоты сканирования (должно быть несколько больше значения верхней границы полосы пропускания). Настроить плоттер таким образом, чтобы почти во весь экран располагалась часть характеристики, соответствующая полосе пропускания.

Замерить на полученной АЧХ резонансную частоту и границы полосы пропускания.

3. Построить экспериментальную фазовую частотную характеристику (ФЧХ)

Используя схему на рис. 3. Определить по ФЧХ фазовый сдвиг между синусоидами э.д.с. и напряжения на резисторе в цепи на резонансной частоте ϕ_0 , и на границах полосы пропускания $\phi_{\rm H}$ и $\phi_{\rm B}$. Расчетные значения можно получить, используя формулу:

$$\phi = \operatorname{arctg} \frac{2\pi fC - \frac{1}{2\pi fL}}{R_3}$$

При работе с осциллографом прежде, чем измерять величину сдвига фаз, необходимо определить, какой из сигналов опережает, а какой отстает. От этого зависит знак угла сдвига фаз φ . Если начало периода тока на экране не отображается, то сравниваются окончания первого полупериода: первым к нулю вернется тот график, который начался раньше. Угол сдвига фаз при этом отрицателен.

Модуль угла сдвига фаз φ это расстояние между началами или между концами периода (положительного полупериода) сигналов в делениях сетки экрана. Далее значение модуля φ находится из пропорции, учитывая, что один полный период любого колебания равен 360 градусов.

Чтобы определить значение фазового сдвига в градусах рассчитайте период вашего сигнала и подставьте значения в формулу:

$$\varphi = \frac{360^{\circ}\Box(T_2 - T_1)}{T}$$

В цифровом осциллографе процедура несколько проще. Выставьте амплитуду наиболее удобную для наблюдения на каждом канале осциллографа. С помощью шкалы временной развертки добейтесь наиболее удобного для анализа вида сигналов. Переместите визир «1» в точку пересечения первой синусоиды с осью симметрии. Переместите визир «2» в, ближайшую по отношению к первому визиру, точку пересечения второй синусоиды. В правом информационном окне в поле T_2 - T_1 будет показано значение задержки между сигналами в микросекундах.

В среде Multisim можно воспользоваться инструментом графопостроитель, аналогично заданию 2, выбрав в окне настроек режим фаза.

4. Построить экспериментальную зависимость напряжений на реактивных элементах от частоты

Собрать схему по рис. 4.



Рис. 4. Схема измерения напряжений на реактивных элементах

Обратите внимание что вольтметры должны быть настроены на измерение действующих значений переменного напряжения.

Для снятия зависимостей изменять частоту генератора в пределах полосы пропускания, полученной экспериментально. Замерять напряжения на резисторах R_1 и R_2 и пересчитать их в токи по закону Ома.

5. Построить экспериментальную зависимость потребляемого тока от частоты

Подключить один из вольтметров к резистору *R*₃ и изменять частоту генератора в пределах полосы пропускания.

Результаты экспериментов по п.п. 4 и 5 занести в табл. 3.

Таблица 3. Результаты экспериментов

	·	1		
f, Гц				
I _L , мА				
I _C , мА				
I _р , мА				

Оформить результаты в виде графиков на одном рисунке.

6. Исследовать влияние величины сопротивлений резисторов R1 и R2 на резонансные характеристики

Для выполнения задания повторите п.п. 1, 2, 3 программы и замерить токи всех ветвей при резонансе для следующих сочетаний

сопротивлений резисторов R_1 и R_2 :

-
$$R_1 = R_2 = 4$$
 Ом;

$$- R_1 = 4 \text{ Om}, R_2 = 1 \text{ Om};$$

$$- R_1 = 1 \text{ Om}, R_2 = 4 \text{ Om};$$

По результатам расчетов и экспериментов заполните табл. 4. Таблица 4. Результат измерений и расчетов

		f_{0} ,	П,	Q	$I_{\rm L0}$,	$I_{\rm C0}$,	I_0 ,	φ ₀ ,	ф н,	ф _в ,
		Γц	Γц		мА	мА	мА	град	град	град
<i>R</i> ₁ =1Ом	Расчет									
<i>R</i> ₂ =1Ом	Эксперимент									
<i>R</i> ₁ =7Ом	Расчет									
<i>R</i> ₂ =4Ом	Эксперимент									
<i>R</i> ₁ =4Ом	Расчет									
<i>R</i> ₂ =1Ом	Эксперимент									
<i>R</i> ₁ =1Ом	Расчет									
<i>R</i> ₂ =4Ом	Эксперимент									

7. Исследовать влияние величины емкости конденсатора на резонансные характеристики

Установить сопротивление резисторов $R_1 = R_2 = 1$ Ом и емкость конденсатора отличную от исходного значения (смотри таблица 1).

Произвести расчеты и эксперименты согласно п.п. 1, 2 программы и определить токи всех ветвей при резонансе. По результатам расчетов и экспериментов заполнить табл. 5.

		$f_0,$	П, Ги	Q	$I_{L0},$	$I_{\rm C0},$	$I_0,$
		ΙЦ	тц				IVIT X
$C_1 =$	Расчет						
мкФ	Эксперимент						
$C_2 =$	Расчет						
мкФ	Эксперимент						

Таблица 5. Результат измерений и расчетов

В табл. 5 под C₁ понимается начальное значение емкости конденсатора, под C₂ – измененное.

8. Исследовать влияние величины индуктивности на резонансные характеристики

Установить сопротивление резисторов $R_1 = R_2 = 1$ Ом и начальное значение емкости конденсатора. Установите индуктивность катушки отличную от исходного значения (табл. 1).

Произвести расчеты и эксперименты согласно п.п. 1, 2 программы

и замерить напряжения на реактивных элементах. По результатам расчетов и экспериментов заполнить табл. 6.

		<i>f</i> ₀ , Гц	П, Гц	Q	<i>I</i> _{L0} , мА	<i>I</i> _{C0} , мА	<i>I</i> ₀ , мА
$L_1 =$	Расчет						
мкГн	Эксперимент						
$L_2=$	Расчет						
мкГн	Эксперимент						

Таблица 6. Результат измерений и расчетов

В табл. 6 под *L*₁ понимается начальное значение индуктивности катушки, под *L*₂ – измененное.

9. сделать подробные выводы по результатам всех проведенных экспериментов

Контрольные вопросы

1. Что называют резонансом токов? Назовите условия возникновения резонанса токов.

2. От каких параметров зависит резонансная частота в параллельном колебательном контуре?

3. Постройте векторную диаграмму для цепи при резонансе токов.

4. Где применяется явление резонанса токов?

5. Какой вид имеет АЧХ при резонансе токов?

6. Какой вид имеет ФЧХ при резонансе токов?

7. Что можно сказать о токах, протекающих через реактивные элементы при резонансе токов?

8. Что такое добротность? Как она определяется для параллельного колебательного контура?

9. Какими параметрами характеризуется электрическая цепь при резонансе токов?

ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №6 «Резонанс в последовательном колебательном контуре»

<u>Цель работы</u>

Целью лабораторной работы является определение параметров последовательного колебательного контура и изучение явления резонанса напряжений. В настоящей работе исследуется простейшая цепь, содержащая последовательно включенные резистор, конденсатор и индуктивный элемент (*RLC* - цепь). При резонансе в такой цепи напряжения на конденсаторе и индуктивном элементе равны по величине и противоположны по фазе, а ток имеет максимальное значение.

Описание лабораторного макета

Лабораторная установка состоит из лабораторного макета «Резонанс в последовательном колебательном контуре», измерительного блока, генератора и осциллографа. Внешний вид лицевой панели лабораторного макета со схемой электрической принципиальной приведен на рис. 1. Питание макета осуществляется от сети переменного тока 220 В, 50 Гц.



Рис. 1. Макет «Резонанс в последовательном колебательном контуре»

Макет содержит источник синусоидальной электродвижущей силы (э.д.с.) Е и три нагрузки, параметры которых можно дискретно изменять с помощью пакетных переключателей.

	Положения соответствующего переключателя							
Лементы	1	2	3	4				
<i>R</i> , Ом	10	20	30	40				
С, мкФ	0,5	0,66	1	2				
<i>L</i> , мкГн	680	1360	2040	2720				

Значения параметров нагрузок приведены в табл. 1.

Таблица 1. Значения параметров нагрузок

Источник *E* управляется от внешнего генератора, который подсоединяется к гнездам "1" и "2" макета (к гнездам, расположенным вертикально рядом с символом «~»). Значение амплитуды снимаемого с генератора сигнала не должно превышать 1,5 В. В качестве внешнего генератора предлагается использовать генератор сигналов UNI-T UTG9002C.

В ходе работы контролируйте режим работы измерительного прибора в соответствии с заданием. Неправильное включение прибора в цепь может привести к травмам и повреждению приборов.

Данную лабораторную работу можно выполнить и с использованием программного обеспечения NI Multisim. При этом в качестве основного измерительного инструмента необходимо использовать графопостроитель (Bode Plotter) (рис. 2).



Рис. 2. Инструмент графопостроитель и его панель управления

Задание на лабораторную работу

1. Рассчитать основные характеристики резонансного контура

Исходные данные в соответствии с номером варианта взять из табл. 2. Сопротивление резистора R = 10 Ом, действующее значение э.д.с. генератора установить порядка E = 1 В.

Таблица 2. Исходные данные

Элементы	Вариант №									
	1	1 2 3 4 5 6 7 8								
<i>L</i> , мкГн	680	680	1360	1360	2040	2040	2720	2720		
С, мкФ	0,5	2	1	0,66	0,5	2	1	0,66		

Основные расчетные соотношения:

$$f_{0} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} - \text{резонансная частота;}$$

$$f_{H} = \frac{f_{0}}{2Q}(\sqrt{1+4Q^{2}}-1) - \text{нижняя граница полосы пропускания;}$$

$$f_{g} = \frac{f_{0}}{2Q}(\sqrt{1+4Q^{2}}+1) - \text{верхняя граница полосы пропускания;}$$

$$\Pi = f_{g} - f_{H} = \frac{f_{0}}{Q} - \text{полоса пропускания;}$$

$$Q = \frac{\rho}{R} - \text{добротность;}$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} - \text{характеристическое сопротивление;}$$

$$U_{Lp} = U_{Cp} = Q \frac{E_{m}}{\sqrt{2}} - \text{ напряжения (действующие значения) на}$$
индуктивном элементе и на конденсаторе при резонансе;
$$I_{p} = \frac{E_{m}}{\sqrt{2}R} - \text{действующе значение тока в цепи при резонансе;}$$

 $\phi = arctg \frac{2\pi fC}{R}$ - фазовый сдвиг на заданной частоте.

2. Построить экспериментальную амплитудную частотную характеристику (АЧХ)

Установить на макете с помощью пакетных переключателей заданные значения параметров элементов и подключить осциллограф, как показано на рис. 3.



Рис. 3. Схема подключения измерительных приборов

АЧХ является основной характеристикой резонансной цепи и показывает зависимость тока в цепи I от частоты f, или, в относительных единицах, зависимость от f.

Но с другой стороны, напряжение на резисторе, а при резонансе. Таким образом, зависимость от f полностью повторяет зависимость от f. Поэтому на схеме на один канал осциллографа подано напряжение источника (с гнезд «1» и «2»), а на другой – напряжение на резисторе (с гнезд «1» и «3»).

С помощью осциллографа можно наблюдать, как на частоте резонанса осциллограммы напряжений на входе цепи и на резисторе совпадают. При уменьшении частоты от резонансной можно наблюдать как осциллограмма напряжений на резисторе начинает уменьшаться по амплитуде, и смещаться левее относительно входного напряжения. При увеличении частоты от резонансной можно наблюдать как осциллограмма напряжений на резисторе начинает уменьшаться по амплитуде, и смещаться правее относительно входного напряжения. Построить АЧХ можно сняв несколько точек с экрана осциллографа и

отношение $\frac{U_R}{F}$ при заданных частотах. найдя ИХ Ho проще воспользоваться графопостроителем в среде Multisim. Для этого необходимо установить диапазон сканирования частоты плоттера таким образом, чтобы в него попала резонансная частота, определенная расчетным путем. Затем экспериментально подобрать верхнее значение частоты сканирования (должно быть несколько больше значения верхней границы полосы пропускания). Настроить плоттер таким образом, чтобы почти BO весь экран располагалась часть характеристики, соответствующая полосе пропускания.

Замерить на полученной АЧХ резонансную частоту и границы полосы пропускания.

3. Рассчитать и построить график АЧХ

Для расчетов использовать формулу:

$$\frac{I}{I_p} = \frac{R}{\sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}}, \text{ где } X_C = \frac{1}{2\pi fC}, X_L = 2\pi fL$$

Частоту изменять в пределах полосы пропускания, полученной расчетным путем (можно использовать MathCAD).

4. Построить экспериментальную фазовую частотную характеристику (ФЧХ)

Используя схему на рис. 3. Определить по ФЧХ фазовый сдвиг между синусоидами э.д.с. и напряжения на резисторе в цепи на резонансной частоте ϕ_0 , и на границах полосы пропускания ϕ_{H} и ϕ_{B} . Расчетные значения можно получить, используя формулу:

$$\phi = arctg \, \frac{2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}}{R}$$

При работе с осциллографом прежде, чем измерять величину сдвига фаз, необходимо определить, какой из сигналов опережает, а какой отстает. От этого зависит знак угла сдвига фаз φ . Если начало периода тока на экране не отображается, то сравниваются окончания первого полупериода: первым к нулю вернется тот график, который начался раньше. Угол сдвига фаз при этом отрицателен.

Модуль угла сдвига фаз φ это расстояние между началами или между концами периода (положительного полупериода) сигналов в делениях сетки экрана. Далее значение модуля φ находится из пропорции, учитывая, что один полный период любого колебания равен 360 градусов.

Чтобы определить значение фазового сдвига в градусах рассчитайте период вашего сигнала и подставьте значения в формулу:

$$\varphi = \frac{360^{\circ}\Box(T_2 - T_1)}{T}$$

В цифровом осциллографе процедура несколько проще. Выставьте амплитуду наиболее удобную для наблюдения на каждом канале осциллографа. С помощью шкалы временной развертки добейтесь наиболее удобного для анализа вида сигналов. Переместите визир «1» в точку пересечения первой синусоиды с осью симметрии. Переместите визир «2» в, ближайшую по отношению к первому визиру, точку пересечения второй синусоиды. В правом информационном окне в поле T_2 - T_1 будет показано значение задержки между сигналами в

микросекундах.

В среде Multisim можно воспользоваться инструментом графопостроитель, аналогично заданию 2, выбрав в окне настроек режим фаза.

5. Построить экспериментальную зависимость напряжений на реактивных элементах от частоты

Собрать схему по рис. 4.



Рис. 4. Схема измерения напряжений на реактивных элементах

Обратите внимание что вольтметры должны быть настроены на измерение действующих значений переменного напряжения.

6. Построить экспериментальную зависимость напряжений на резисторе от частоты

Подключить один из вольтметров к резистору и изменять частоту генератора в пределах полосы пропускания.

Результаты экспериментов по п.п. 5 и 6 занести в табл. 3.

Таблица 3. Результаты экспериментов

<i>f</i> , Гц			
$U_{ m L}$, м ${ m B}$			
<i>U</i> _C , мВ			
$U_{\rm R}$, мВ			

Оформить результаты в виде графиков на одном рисунке.

7. Исследовать влияние величины сопротивления резистора на резонансные характеристики

Для выполнения задания повторите п.п. 1, 2, 4 программы и замерьте напряжения на элементах цепи при резонансе для значений сопротивления резистора *R* соответственно: 20 Ом, 30 Ом, 40 Ом.

По результатам расчетов и экспериментов заполните табл. 4.

		<i>f</i> ₀ , Гц	<i>f</i> _н , Гц	<i>f</i> в, Гц	П, Гц	Q	$U_{L0},$ B	<i>U</i> _{C0} , В	<i>I</i> ₀ , мА	ф ₀ , град	ф _н , град	ф _в , град
<i>R</i> =10	Расчет											
Ом	Эксперимент											
<i>R</i> =20	Расчет											
Ом	Эксперимент											
<i>R</i> =30	Расчет											
Ом	Эксперимент											
<i>R</i> =40	Расчет											
Ом	Эксперимент											

Таблица 4. Результаты измерений и расчетов

8. Исследовать влияние величины емкости конденсатора на резонансные характеристики

Установить сопротивление резистора R = 10 Ом и емкость конденсатора отличную от исходного значения (табл. 1).

Произвести расчеты и эксперименты согласно п.п. 1, 2 программы и замерить напряжения на реактивных элементах. По результатам расчетов и экспериментов заполнить табл. 5.

		<i>f</i> ₀ , Гц	<i>f</i> _н , Гц	<i>f</i> в, Гц	П, Гц	Q	$U_{ m L0},$ B	<i>U</i> _{С0} , В	<i>I</i> ₀ , мА
$C_1 =$	Расчет								
мкФ	Эксперимент								
$C_2 =$	Расчет								
мкФ	Эксперимент								

Таблица 5. Результаты измерений и расчетов

В табл. 5 под C₁ понимается начальное значение емкости конденсатора, под C₂-измененное.

9. Исследовать влияние величины индуктивности на резонансные характеристики

Установить сопротивление резистора R = 10 Ом и начальное значение емкости конденсатора. Установите индуктивность катушки отличную от исходного значения (табл. 1).

Произвести расчеты и эксперименты согласно п.п. 1, 2 программы и замерить напряжения на реактивных элементах. По результатам расчетов и экспериментов заполнить табл. 6.

		f_0 ,	$f_{\scriptscriptstyle \mathrm{H}}$,	fв,	П,	Q	$U_{ m L0}$,	U_{C0} ,	I_0 ,
		Γц	Γц	Γц	Γц		В	В	мА
$L_1 =$	Расчет								
мкГн	Эксперимент								
$L_2 =$	Расчет								
мкГн	Эксперимент								

Таблица 6. Результаты измерений и расчетов

В табл. 6 под *L*₁ понимается начальное значение индуктивности катушки, под *L*₂ – измененное.

10. сделать подробные выводы по результатам всех проведенных экспериментов

Контрольные вопросы

1. Что называют резонансом напряжений? Назовите условия возникновения резонанса напряжений.

2. От каких параметров зависит резонансная частота в последовательном колебательном контуре?

3. Постройте векторную диаграмму для цепи при резонансе напряжений.

4. Где применяется явление резонанса напряжений?

5. Какой вид имеет АЧХ при резонансе напряжений?

6. Какой вид имеет ФЧХ при резонансе напряжений?

7. Что можно сказать про напряжение на реактивных элементах при резонансе напряжений?

8. Что такое добротность? Как она определяется для последовательного колебательного контура?

9. Какими параметрами характеризуется электрическая цепь при резонансе напряжений?