

**Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ИТМО**

Факультет безопасности информационных технологий

Дисциплина:
«Электротехника»

О Т Ч Е Т
ПО ЛАБОРАТОРНОЙ РАБОТЕ №2

**Исследование линейных двухполюсников в электрических цепях
однофазного синусоидального тока**

Группа N3246, поток ЭЛТЕХ. N23 1.4.1
Вариант 28

Работу выполнил: *студент Суханкулиев М.*

Дата защиты: *21.04.2025*

Контрольный срок защиты: *21.04.2025*

Количество баллов:

Санкт-Петербург
2025 г.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Часть 1	5
1.1 Схемы исследуемых цепей (1–9)	5
1.2 Расчётные формулы и расчёты. Заполненная таблица 2	6
1.3 Векторные диаграммы входных напряжений и токов для каждого из двухполюсников	8
1.4 Выводы по части 1 лабораторной работы	9
2 Часть 2	10
2.1 Схема исследуемой цепи (6, 9)	10
2.2 Расчётные формулы и расчёты. Заполненные таблицы 3 и 4	11
2.3 Графики характеристик $I(f)$, $\varphi(f)$, $U_{RI}(f)$, $U_k(f)$, $U_C(f)$ для схемы №6	14
2.4 Графики характеристик $I(f)$, $I_1(f)$, $I_2(f)$, $\varphi(f)$ для схемы №9	15
2.5 Выполненные в масштабе векторные диаграммы для состояния резонанса в схемах №6 и №9.	16
2.6 Выводы по части 2 лабораторной работы	17
Заключение	18
Список использованных источников	19

ВВЕДЕНИЕ

Параметры источника и нагрузки для выполнения лабораторной работы

№ вар	U , В	ψ , градус		f , Гц	R_1 , Ом		R_k , Ом	L_k , мГн	C , мкФ
		Часть 1	Часть 2		Часть 1	Часть 2			
28	5	0	60	159.155	20	25	30	51.962	18.199

Цель работы – исследование свойств линейных цепей синусоидального тока, а также особых режимов работы, таких как резонанс напряжений и токов.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

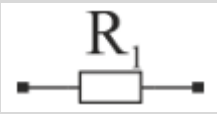

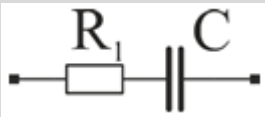

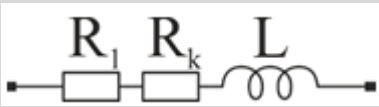

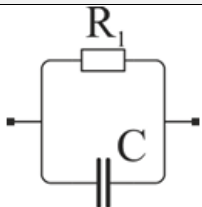
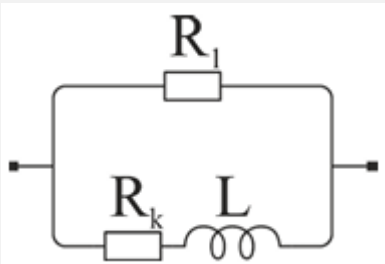
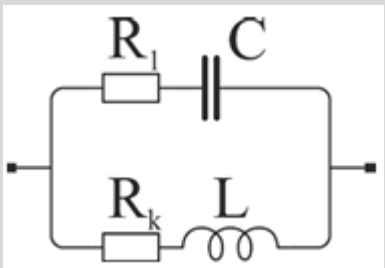
Часть 1:

- Измерение действующих значений входного напряжения, тока и фазового сдвига между ними для каждого двухполюсника таблицы 1. Сравнение результатов с расчётными значениями.

Часть 2:

- Исследование и анализ частотных характеристик электрической цепи с последовательным соединением резистивного, индуктивного и ёмкостного элементов.
- Исследование и анализ частотных характеристик электрической цепи с параллельным соединением ветвей с индуктивным и ёмкостным элементами.

Таблица 1

№	Схема двухполюсника	Расчётные соотношения
1		$I = \frac{U}{Z}, R = R_1, X = 0, Z = R_1,$ $\varphi = \arctan \frac{0}{R_1} = 0$
2		$I = \frac{U}{Z}, R = 0, X = -X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C},$ $Z = X_C, \varphi = \arctan -\infty = -\frac{\pi}{2}$
3		$I = \frac{U}{Z}, R = R_1, X = -X_C = -\frac{1}{\omega \cdot C},$ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \varphi = \arctan \frac{X}{R}$
4		$I = \frac{U}{Z}, R = R_k, X = X_L = \omega \cdot L,$ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \varphi = \arctan \frac{X}{R}$
5		$I = \frac{U}{Z}, R = R_1 + R_k, X = X_L = \omega \cdot L,$ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \varphi = \arctan \frac{X}{R}$
6		$I = \frac{U}{Z}, R = R_1 + R_k,$ $X = X_L - X_C = \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C},$ $Z = \sqrt{R^2 + X^2}, \varphi = \arctan \frac{X}{R}$
7		$I = U \cdot Y, G = \frac{1}{R_1}, B = -B_C = -\omega \cdot C,$ $Y = \sqrt{G^2 + B^2}, \varphi = \arctan \frac{B}{G}$
8		$I = U \cdot Y, G = G_1 + G_k, G_1 = \frac{1}{R_1},$ $G_k = \frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2}, B = B_k - B_1,$ $B_1 = 0, B_k = \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2},$ $Y = \sqrt{G^2 + B^2}, \varphi = \arctan \frac{B}{G}$
9		$I = U \cdot Y, G = G_1 + G_k, G_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_C^2},$ $G_k = \frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2}, B = B_k - B_1,$ $B_1 = \frac{X_C}{R_1^2 + X_C^2}, B_k = \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2},$ $Y = \sqrt{G^2 + B^2}, \varphi = \arctan \frac{B}{G}$

1 ЧАСТЬ 1

1.1 Схемы исследуемых цепей (1–9)

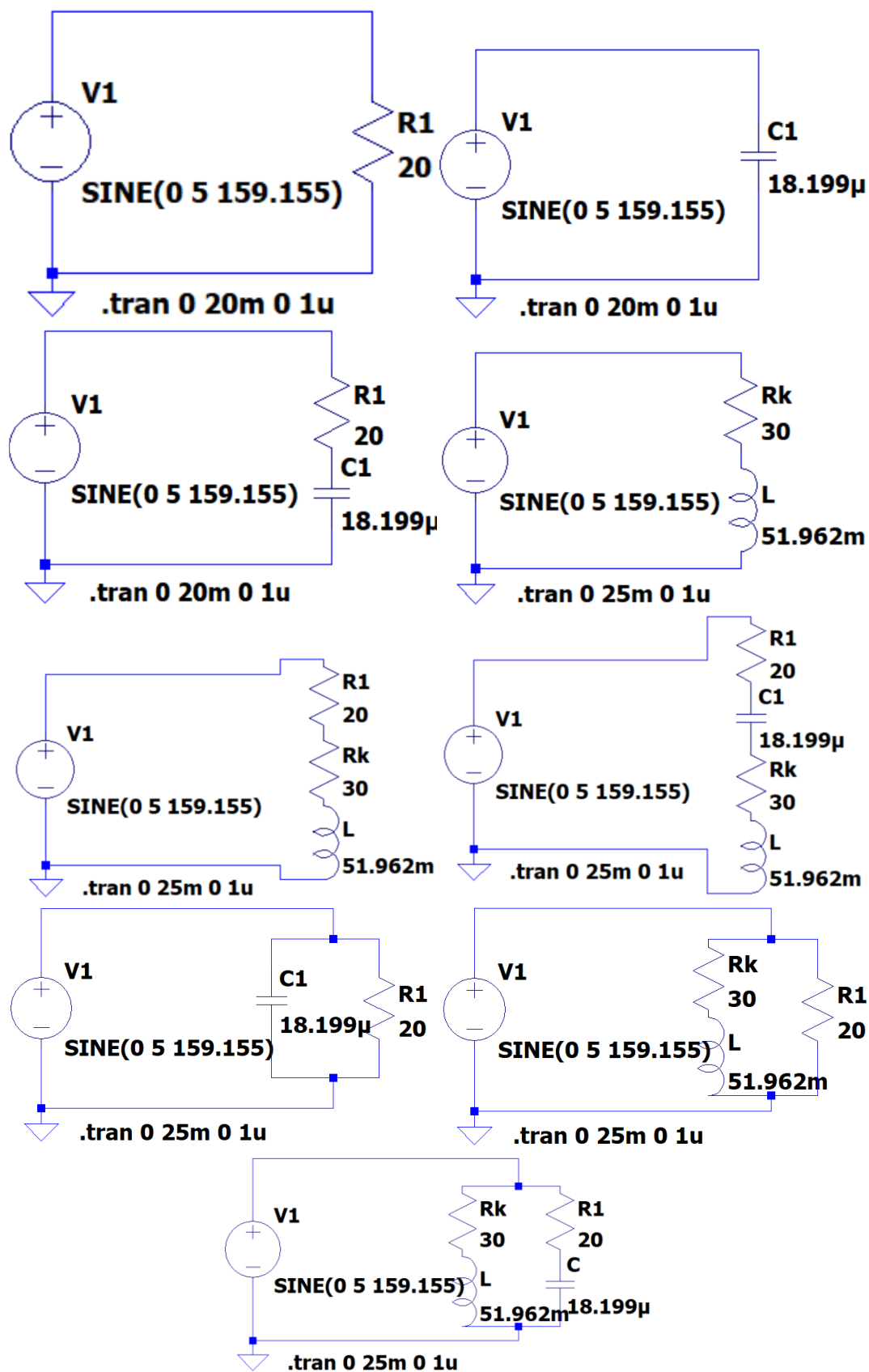


Рисунок 1 – Схемы 1–9 (нумерация: слева направо, сверху вниз)

1.2 Расчётные формулы и расчёты. Заполненная таблица 2

Формулы для расчёта приведены в таблице 1.

Таблица 2

Номер схемы цепи	Параметры двухполюсников				Результаты измерений			Результаты вычислений	
	R_1	R_k	L	C	U	I	φ	I	φ
	Ом		мГн	мкФ	В	А	°	А	°
1	20	-	-	-	5	0.25	0	0.25	0
2	-	-	-	18.199	5	0.091	-90	0.091	-90
3	20	-	-	18.199	5	0.086	-69.65	0.086	-70
4	-	30	51.962	-	5	0.083	59.73	0.083	60
5	20	30	51.962	-	5	0.069	45.86	0.069	46.1
6	20	30	51.962	18.199	5	0.1	-3.55	0.1	-3.42
7	20	-	-	18.199	5	0.266	-20.1	0.266	-20.1
8	20	30	51.962	-	5	0.3	14.3	0.299	13.9
9	20	30	51.962	18.199	5	0.071	-8.03	0.071	-6.6

$$I = \frac{U}{R_1} = \frac{5}{20} = 0.25 \text{ [A]}$$

$$\Delta h = 0 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{\Delta h}{h} = 0^\circ$$

$$I = U \cdot 2\pi f \cdot C = 5 \cdot 2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6} \approx 0.091 \text{ [A]}$$

$$\Delta h \approx 1.57 \text{ [мс]}, h \approx 3.14 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{1.57}{3.14} = 90^\circ$$

$$\text{При этом ток отстаёт от напряжения} \Rightarrow \varphi = -90^\circ$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + \left(-\frac{1}{2\pi f \cdot C}\right)^2}} = \frac{5}{\sqrt{20^2 + \left(-\frac{1}{2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6}}\right)^2}} \approx 0.086 \text{ [A]}$$

$$\varphi = \arctan\left(-\frac{1}{2\pi f \cdot C \cdot R_1}\right) = \arctan\left(-\frac{1}{2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6} \cdot 20}\right) = -70^\circ$$

$$\Delta h \approx 1.215 \text{ [мс]}, h \approx 3.14 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{1.215}{3.14} \approx 69.65^\circ, I \text{ отстаёт} \Rightarrow \varphi \approx -69.65^\circ$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2}} = \frac{5}{\sqrt{30^2 + (2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962)^2}} \approx 0.083 \text{ [A]}$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\pi f \cdot L}{R_k} = \arctan \frac{2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962}{30} \approx 60^\circ$$

$$\Delta h \approx 1.042 \text{ [мс]}, h \approx 3.14 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{1.042}{3.14} \approx 59.73^\circ$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_k)^2 + (2\pi f \cdot L)^2}} = \frac{5}{\sqrt{(20 + 30)^2 + (2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962)^2}} \approx 0.069 \text{ [A]}$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\pi f \cdot L}{R_1 + R_k} = \arctan \frac{2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962}{20 + 30} \approx 46.1^\circ$$

$$\Delta h \approx 0.8 \text{ [мс]}, \quad h \approx 3.14 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{0.8}{3.14} \approx 45.86^\circ$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_k)^2 + \left(2\pi f \cdot L - \frac{1}{2\pi f \cdot C}\right)^2}}$$

$$= \frac{5}{\sqrt{(20 + 30)^2 + \left(2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962 - \frac{1}{2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6}}\right)^2}} \approx \mathbf{0.1 \text{ [A]}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{2\pi f \cdot L - \frac{1}{2\pi f \cdot C}}{R_1 + R_k} = \arctan \frac{2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962 - \frac{1}{2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6}}}{20 + 30} \approx \mathbf{-3.42^\circ}$$

$$\Delta h \approx 0.062 \text{ [мс]}, \quad h \approx 3.14 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{0.062}{3.14} \approx 3.55^\circ, I \text{ отстаёт} \Rightarrow \varphi \approx \mathbf{-3.55^\circ}$$

$$I = U \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{R_1}\right)^2 + (-2\pi f \cdot C)^2} = 5 \cdot \sqrt{\left(\frac{1}{20}\right)^2 + (-2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6})^2} \approx \mathbf{0.266 \text{ [A]}}$$

$$\varphi = \arctan(-2\pi f \cdot C \cdot R_1) = \arctan(-2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6} \cdot 20) \approx \mathbf{-20.1^\circ}$$

$$\Delta h \approx 2.79 \text{ [мс]}, \quad h \approx 3.14 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{2.79}{3.14} \approx \mathbf{159.9^\circ}$$

Эти значения φ можно считать одинаковыми, так как разница между ними — это полный оборот в фазовом пространстве.

$$I = U \cdot \sqrt{\left(\frac{2\pi f \cdot L}{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{R_1} + \frac{R_k}{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2}\right)^2}$$

$$= 5 \cdot \sqrt{\left(\frac{2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962}{30^2 + (2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962)^2}\right)^2 + \left(\frac{1}{20} + \frac{30}{30^2 + (2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962)^2}\right)^2}$$

$$\approx \mathbf{0.299 \text{ [A]}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\frac{2\pi f \cdot L}{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2}}{\frac{1}{R_1} + \frac{R_k}{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2}} = \arctan \frac{\frac{2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962}{30^2 + (2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962)^2}}{\frac{1}{20} + \frac{30}{30^2 + (2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962)^2}} \approx \mathbf{13.9^\circ}$$

$$\Delta h \approx 3.39 \text{ [мс]}, \quad h \approx 3.14 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{3.39}{3.14} \approx \mathbf{194.3^\circ}$$

$$I = U \cdot \sqrt{\left(\frac{2\pi f \cdot L}{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2} - \frac{\frac{1}{2\pi f \cdot C}}{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi f \cdot C}\right)^2}\right)^2 + \left(\frac{R_1}{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi f \cdot C}\right)^2} + \frac{R_k}{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2}\right)^2}$$

$$\approx 5 \cdot \sqrt{\left(\frac{16.54\pi}{30^2 + (16.54\pi)^2} - \frac{\frac{10^3}{5.7929\pi}}{20^2 + \left(\frac{10^3}{5.7929\pi}\right)^2}\right)^2 + \left(\frac{20}{20^2 + \left(\frac{10^3}{5.7929\pi}\right)^2} + \frac{30}{30^2 + (16.54\pi)^2}\right)^2}$$

$$\approx \mathbf{0.071 \text{ [A]}}$$

$$\varphi = \arctan \frac{\frac{2\pi f \cdot L}{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2} - \frac{\frac{1}{2\pi f \cdot C}}{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi f \cdot C}\right)^2}}{\frac{R_1}{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi f \cdot C}\right)^2} + \frac{R_k}{R_k^2 + (2\pi f \cdot L)^2}}$$

$$= \arctan \frac{\frac{2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962}{30^2 + (2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962)^2} - \frac{\frac{1}{2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6}}}{20^2 + \left(\frac{1}{2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6}}\right)^2}}{\frac{20}{20^2 + \left(\frac{1}{2\pi \cdot 159.155 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6}}\right)^2} + \frac{30}{30^2 + (2\pi \cdot 159.155 \cdot 0.051962)^2}} \approx \mathbf{-6.58^\circ}$$

$$\Delta h \approx 3 \text{ [мс]}, \quad h \approx 3.14 \text{ [мс]}, \quad \varphi = 180^\circ \cdot \frac{3}{3.14} \approx \mathbf{171.97^\circ}$$

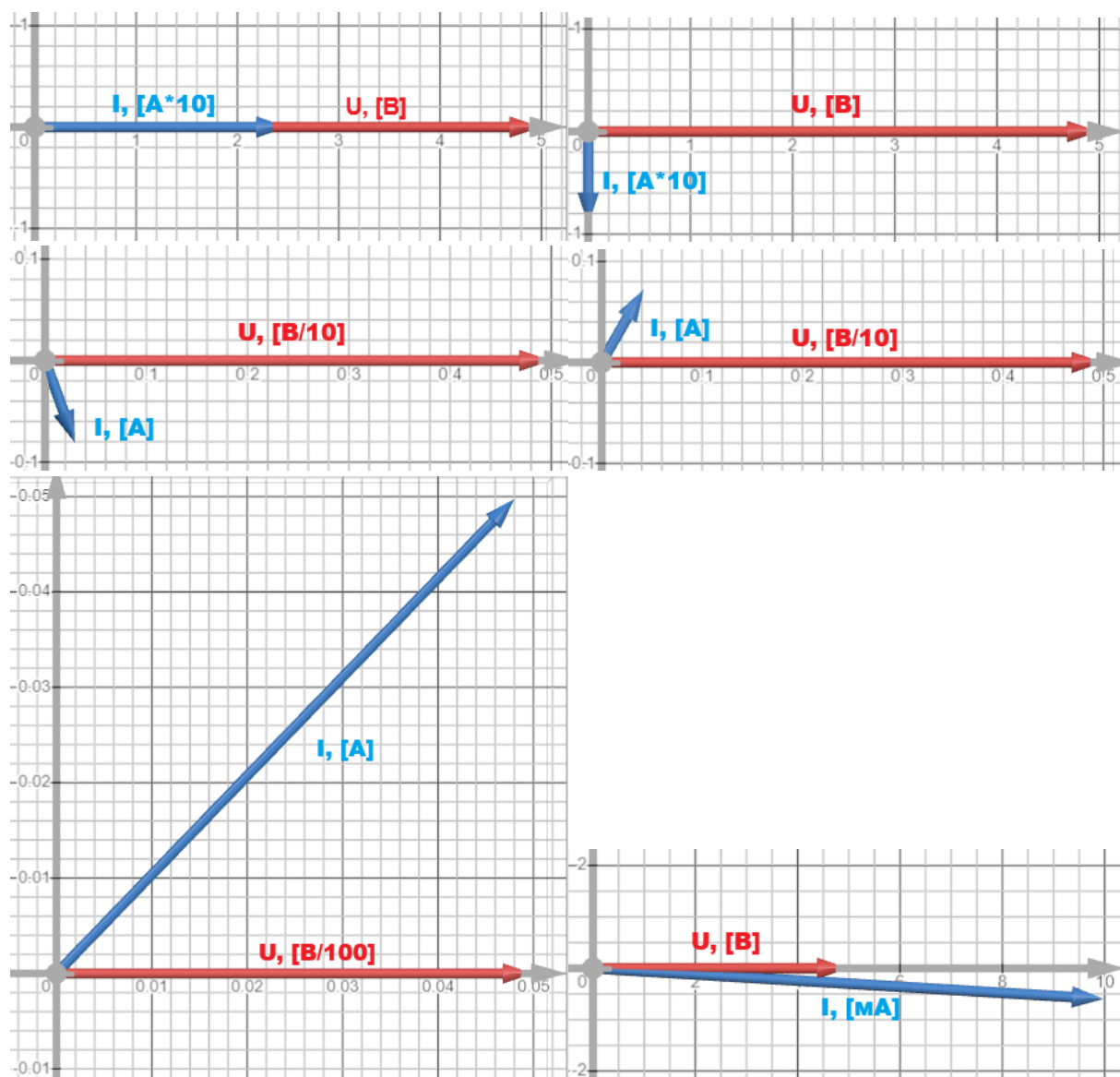
1.3 Векторные диаграммы входных напряжений и токов для каждого из двухполюсников

При $\varphi \approx 0^\circ$, то нагрузка активная – ток и напряжение совпадают по фазе.

При $\varphi > 0^\circ$, ток отстает от напряжения – нагрузка индуктивная.

При $\varphi < 0^\circ$, ток опережает напряжение – нагрузка емкостная.

Зная значения U , I и фазовый сдвиг φ (угол между U и I) нетрудно будет построить векторные диаграммы:



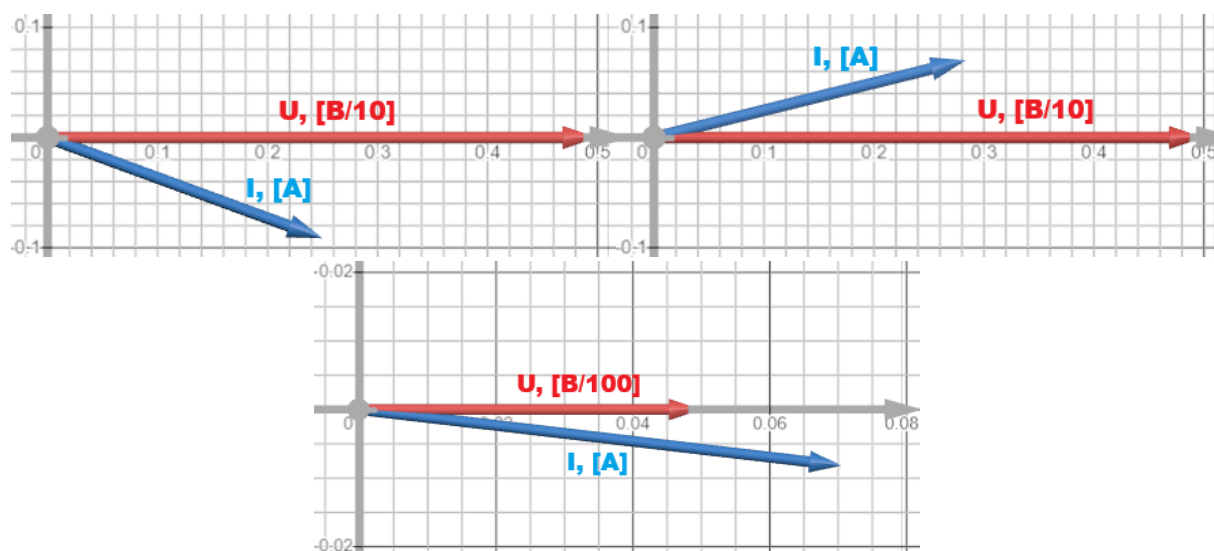


Рисунок 2 – Векторные диаграммы входных U и I для всех двухполюсников

1.4 Выводы по части 1 лабораторной работы

В первой части лабораторной работы были собраны схемы двухполюсников в LTspice, проведены измерения входного тока, напряжения и фазового сдвига между ними. Далее выполнены теоретические расчёты по формулам. Полученные экспериментальные и расчётные значения практически полностью совпали, что подтверждает корректность моделей и методики.

Векторные диаграммы позволяют наглядно представить соотношения между входными напряжением и током (амплитуды и фазовый сдвиг).

2 ЧАСТЬ 2

2.1 Схема исследуемой цепи (6, 9)

Для №6: Рассчитаем резонансную частоту для параметров элементов, заданных в части 1 лабораторной работы:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \text{ Гц} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.051962 \text{ Гн} \cdot 18.199 \cdot 10^{-6} \text{ Ф}}} \approx 163.664 \text{ Гц}$$

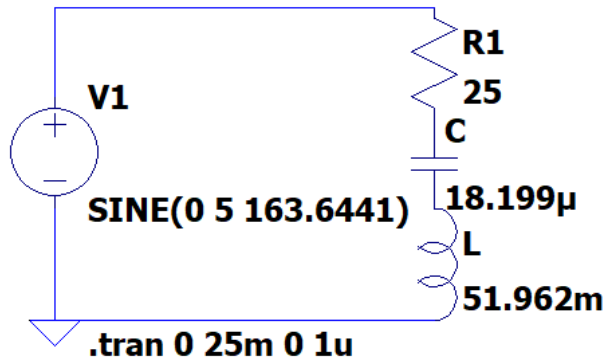


Рисунок 3 – Электрическая цепь со схемой двухполюсника №6

Для №9: Рассчитаем резонансную частоту для параметров элементов, заданных в части 1 лабораторной работы $\left(\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}\right)$:

$$f'_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_k^2}{\rho^2 - R_1^2}} \text{ Гц} = \frac{1}{2\pi\sqrt{0.051962 \cdot 18.199 \cdot 10^{-6}}} \cdot \sqrt{\frac{\frac{0.051962}{18.199 \cdot 10^{-6}} - 30^2}{\frac{0.051962}{18.199 \cdot 10^{-6}} - 25^2}} \approx 153.242 \text{ Гц}$$

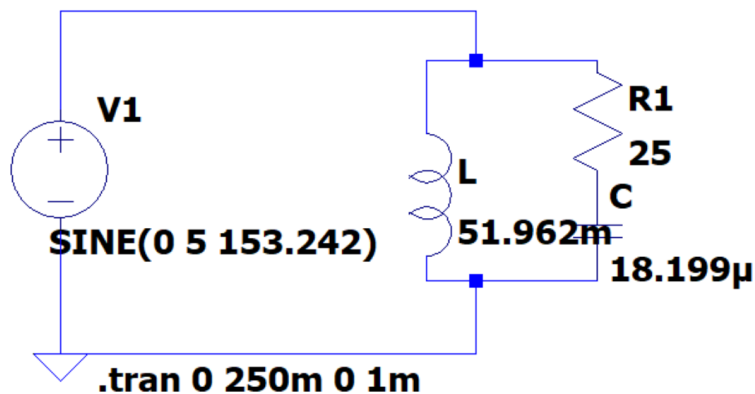


Рисунок 4 – Электрическая цепь со схемой двухполюсника №9

2.2 Расчётные формулы и расчёты. Заполненные таблицы 3 и 4

Формулы для №6:

$$\varphi = \arctan \frac{2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}}{R_1 + R_k}$$

$$I = \frac{U}{\sqrt{(R_1 + R_k)^2 + \left(2\pi fL - \frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

$$U_{R1} = IR_1$$

$$U_k = I \cdot \sqrt{R_k^2 + (2\pi fL)^2}$$

$$U_C = I \cdot \frac{1}{2\pi fC}$$

Таблица 3

<i>f</i>	<i>U</i> = 5 В; <i>R</i> ₁ = 25 Ом; <i>R</i> _к = 30 Ом; <i>L</i> = 51.962 мГн; <i>C</i> = 18.199 мкФ; <i>f</i> ₀ = 163.664 Гц									
	Расчёт					Эксперимент				
	<i>Q</i> _р = 0.972					<i>Q</i> _е = 0.972				
	<i>φ</i>	<i>I</i>	<i>U</i> _{Р1}	<i>U</i> _к	<i>U</i> _с	<i>φ</i>	<i>I</i>	<i>U</i> _{Р1}	<i>U</i> _к	<i>U</i> _с
Гц	°	А	В			°	А	В		
0.1 · <i>f</i> ₀	-84,06	0,009	0,235	0,286	5,023	-84	0,009	0,24	0,29	5,02
0.2 · <i>f</i> ₀	-77,90	0,019	0,477	0,607	5,093	-77,9	0,019	0,48	0,61	5,09
0.3 · <i>f</i> ₀	-71,26	0,029	0,730	0,994	5,203	-71,3	0,029	0,74	1	5,18
0.4 · <i>f</i> ₀	-63,89	0,040	1,000	1,474	5,345	-64,5	0,04	1,01	1,47	5,35
0.5 · <i>f</i> ₀	-55,54	0,051	1,286	2,066	5,497	-55,6	0,052	1,29	2,1	5,5
0.6 · <i>f</i> ₀	-46,02	0,063	1,578	2,772	5,622	-45,3	0,063	1,58	2,82	5,62
0.7 · <i>f</i> ₀	-35,29	0,074	1,855	3,558	5,664	-34,6	0,075	1,88	3,58	5,63
0.8 · <i>f</i> ₀	-23,61	0,083	2,082	4,350	5,564	-22,7	0,084	2,1	4,4	5,53
0.9 · <i>f</i> ₀	-11,59	0,089	2,226	5,048	5,287	-10,5	0,089	2,23	5,1	5,2
<i>f</i> ₀	0,00	0,091	2,273	5,571	4,858	0	0,091	2,27	5,57	4,76
1.1 · <i>f</i> ₀	10,51	0,089	2,235	5,899	4,342	13,8	0,089	2,22	5,86	4,26
1.2 · <i>f</i> ₀	19,61	0,086	2,141	6,062	3,813	21,3	0,085	2,12	6,05	3,71
1.3 · <i>f</i> ₀	27,28	0,081	2,020	6,114	3,321	28,3	0,08	1,98	6,06	3,26
1.4 · <i>f</i> ₀	33,67	0,076	1,891	6,098	2,888	34,5	0,074	1,85	6,02	2,82
1.5 · <i>f</i> ₀	38,99	0,071	1,766	6,047	2,517	40,6	0,069	1,73	5,98	2,45
1.6 · <i>f</i> ₀	43,45	0,066	1,650	5,980	2,204	44,5	0,064	1,6	5,94	2,13
1.7 · <i>f</i> ₀	47,21	0,062	1,544	5,908	1,941	48	0,061	1,53	5,88	1,9
1.8 · <i>f</i> ₀	50,41	0,058	1,449	5,838	1,720	50,8	0,057	1,42	5,77	1,68
1.9 · <i>f</i> ₀	53,16	0,055	1,363	5,771	1,533	52,1	0,053	1,34	5,72	1,5
2 · <i>f</i> ₀	55,54	0,051	1,286	5,709	1,374	55,3	0,05	1,26	5,69	1,34

Добротности контура:

$$Q_p = \frac{\rho}{R_1 + R_k}$$

где $\rho = \sqrt{\frac{L}{C}}$ – характеристическое сопротивление;

$$Q_e = \frac{U_{C0}}{U}$$

где U_{C0} и U – действующие значения напряжения на конденсаторе и входного напряжения измеренные в режиме резонанса.

$$Q_p = \frac{\sqrt{\frac{0.051962}{18.199 \cdot 10^{-6}}}}{25 + 30} \approx 0.972, \quad Q_e = \frac{4.86}{5} \approx 0.972$$

Формулы для №9:

$$\varphi = \arctan \frac{\frac{2\pi fL}{R_k^2 + (2\pi fL)^2} - \frac{\frac{1}{2\pi fC}}{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}{\frac{R_1}{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2} + \frac{R_k}{R_k^2 + (2\pi fL)^2}}$$

$$I = U \cdot \sqrt{\left(\frac{R_1}{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2} + \frac{R_k}{R_k^2 + (2\pi fL)^2}\right)^2 + \left(\frac{2\pi fL}{R_k^2 + (2\pi fL)^2} - \frac{\frac{1}{2\pi fC}}{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}\right)^2}$$

$$I_1 = \frac{U}{\sqrt{R_k^2 + (2\pi fL)^2}}$$

$$I_2 = \frac{U}{\sqrt{R_1^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2}}$$

Таблица 4

f	$U = 5 \text{ В}; R_1 = 25 \text{ Ом}; R_k = 30 \text{ Ом}; L = 51.962 \text{ мГн}; C = 18.199 \text{ мкФ}; f'_0 = 153.242 \text{ Гц}$							
	Расчёт				Эксперимент			
	φ	I	I_1	I_2	φ	I	I_1	I_2
Гц	°	А			°	А		
$0.1 \cdot f'_0$	6,423	0,164	0,164	0,009	6,3	0,163	0,164	0,009
$0.2 \cdot f'_0$	12,156	0,155	0,158	0,017	12,2	0,155	0,158	0,018
$0.3 \cdot f'_0$	16,640	0,143	0,149	0,026	16,6	0,142	0,148	0,027
$0.4 \cdot f'_0$	19,494	0,129	0,139	0,035	19,4	0,129	0,139	0,036
$0.5 \cdot f'_0$	20,498	0,115	0,128	0,043	20,4	0,115	0,128	0,044
$0.6 \cdot f'_0$	19,550	0,102	0,118	0,051	19,5	0,101	0,118	0,053
$0.7 \cdot f'_0$	16,680	0,092	0,108	0,059	16,6	0,092	0,107	0,061
$0.8 \cdot f'_0$	12,113	0,084	0,100	0,066	12,1	0,084	0,100	0,067
$0.9 \cdot f'_0$	6,324	0,079	0,092	0,073	6,3	0,079	0,092	0,073
f'_0	0,000	0,076	0,086	0,080	-0,5	0,076	0,085	0,082
$1.1 \cdot f'_0$	-6,149	0,076	0,080	0,087	-6,2	0,077	0,079	0,088
$1.2 \cdot f'_0$	-11,606	0,078	0,074	0,093	-11,7	0,078	0,074	0,093
$1.3 \cdot f'_0$	-16,127	0,081	0,070	0,099	-16,2	0,081	0,070	0,100
$1.4 \cdot f'_0$	-19,695	0,086	0,066	0,105	-19,7	0,086	0,066	0,105
$1.5 \cdot f'_0$	-22,411	0,090	0,062	0,110	-22,5	0,090	0,061	0,111
$1.6 \cdot f'_0$	-24,419	0,095	0,058	0,115	-24,5	0,094	0,058	0,115
$1.7 \cdot f'_0$	-25,862	0,100	0,055	0,119	-25,9	0,100	0,055	0,120
$1.8 \cdot f'_0$	-26,861	0,105	0,053	0,124	-26,9	0,104	0,053	0,124
$1.9 \cdot f'_0$	-27,517	0,109	0,050	0,128	-27,6	0,109	0,050	0,128
$2 \cdot f'_0$	-27,909	0,114	0,048	0,132	-28,0	0,113	0,047	0,132

2.3 Графики характеристик $I(f)$, $\varphi(f)$, $U_{R1}(f)$, $U_k(f)$, $U_C(f)$ для схемы №6

Штриховые линии – экспериментальные данные

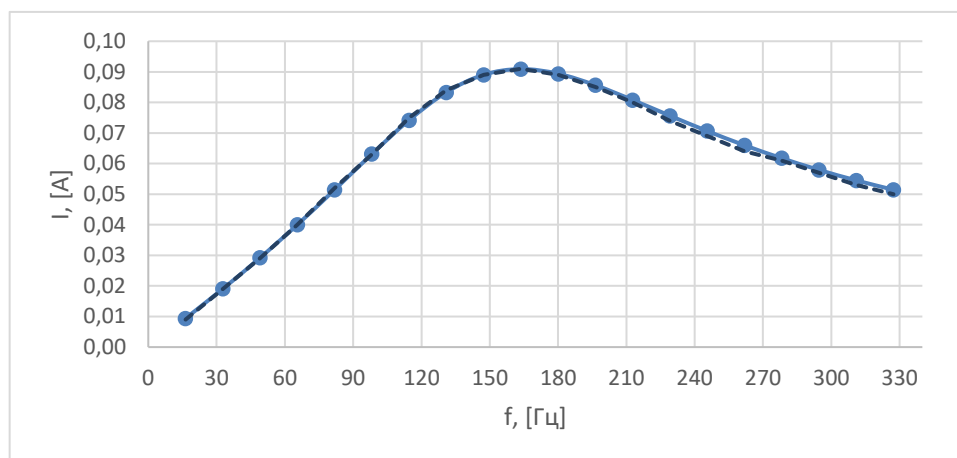


Рисунок 5 – График зависимости $I(f)$

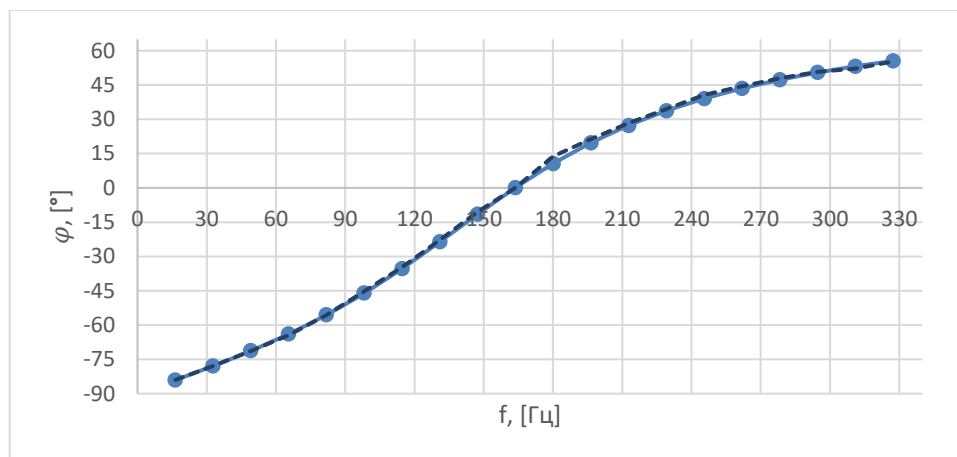


Рисунок 6 – График зависимости $\varphi(f)$

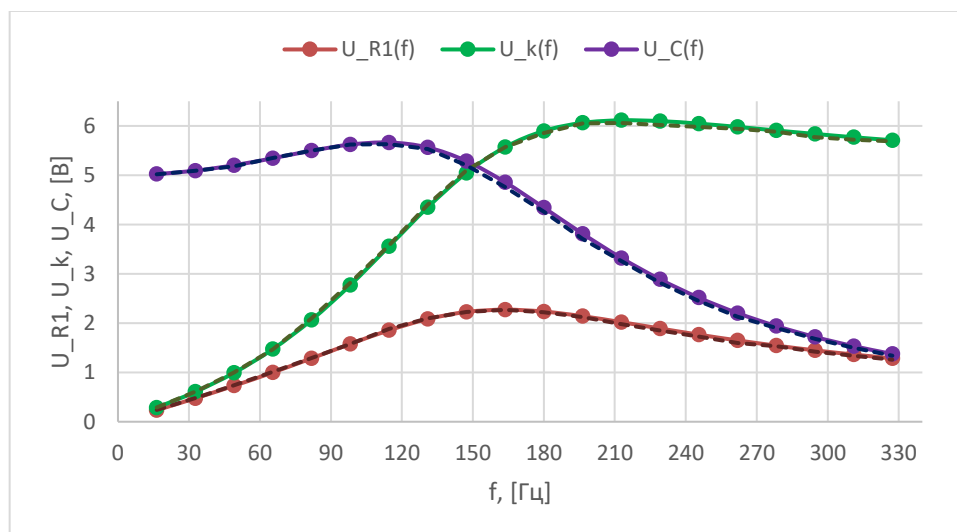


Рисунок 7 – Графики зависимостей $U_{R1}(f)$, $U_k(f)$, $U_C(f)$

2.4 Графики характеристик $I(f)$, $I_1(f)$, $I_2(f)$, $\varphi(f)$ для схемы №9

Штриховые линии – экспериментальные данные

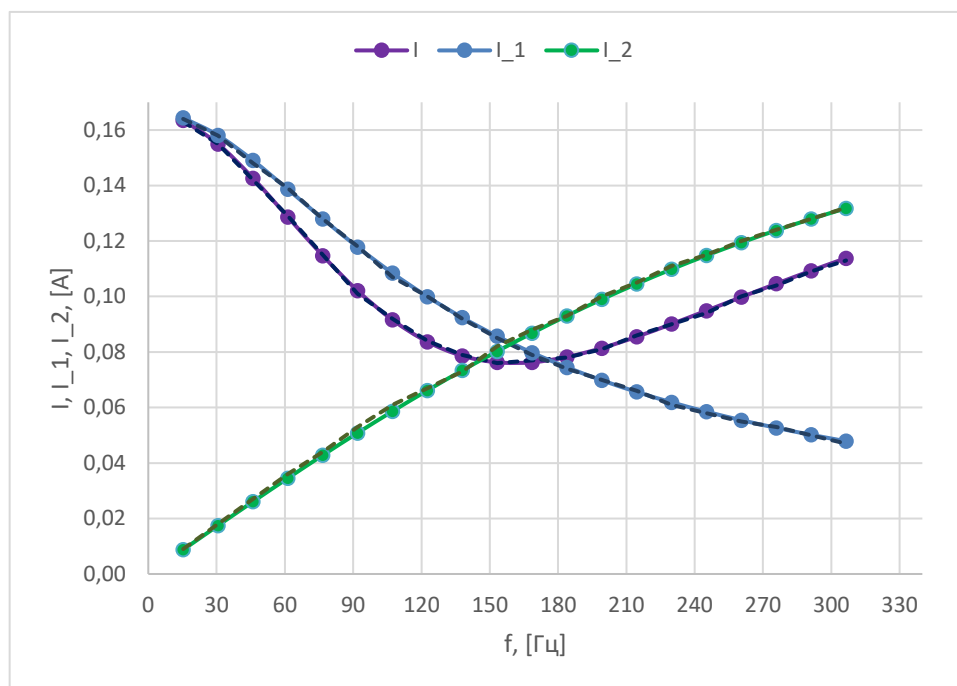


Рисунок 8 – Графики зависимостей $I(f)$, $I_1(f)$, $I_2(f)$

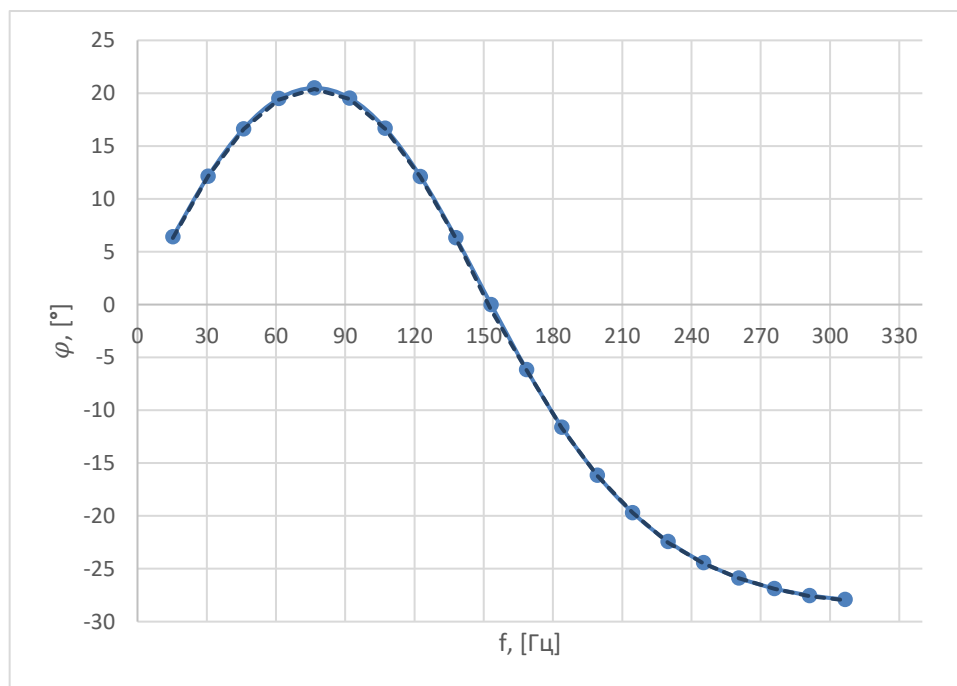


Рисунок 9 – График зависимости $\varphi(f)$

2.5 Выполненные в масштабе векторные диаграммы для состояния резонанса в схемах №6 и №9.

Для №6:

В резонансе ток I и напряжение U в фазе: $\varphi = 0$, ток направлен горизонтально вправо.

Напряжение на резисторе R_1 – в фазе с током.

Напряжение на катушке (индуктивное + активное сопротивление R_k) – отстаёт на угол меньше 90° , так как катушка не идеальна.

$$U_k \text{ будет под углом } \psi_k = \arctan \frac{X_L}{R_k} = \arctan \frac{2\pi f L}{R_k} \approx \frac{53.434}{30} \approx 60.688^\circ$$

Напряжение на конденсаторе – всегда противофазно току: вертикально вниз.

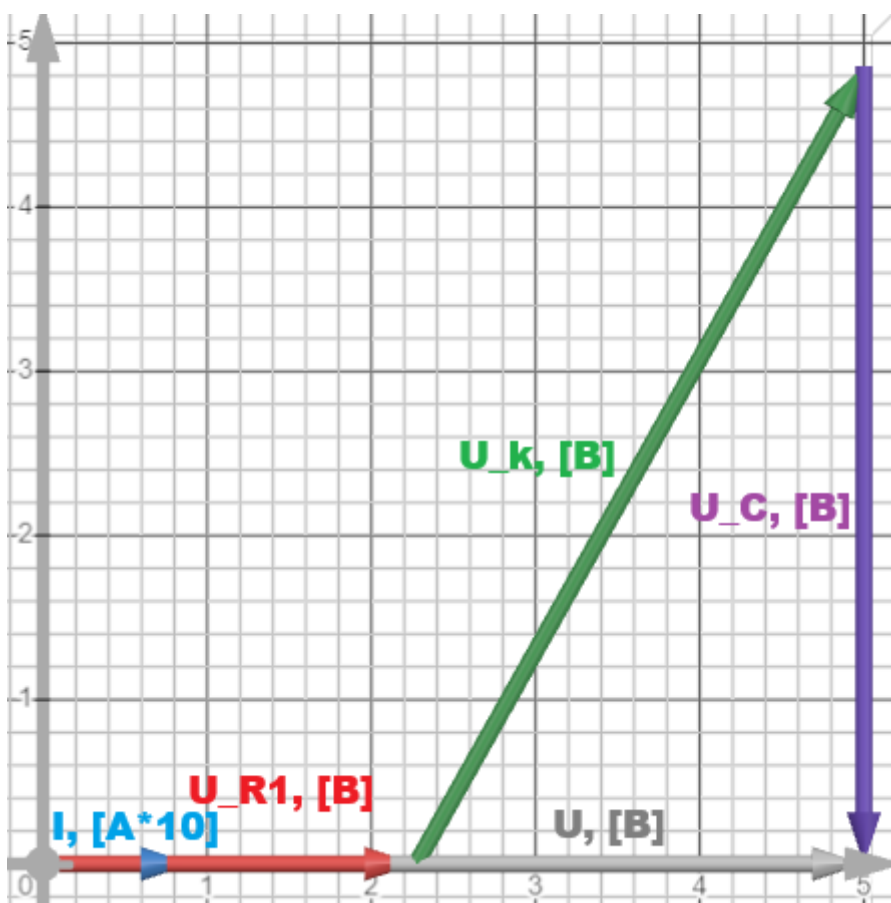


Рисунок 10 – Векторная диаграмма для состояния резонанса в схеме №6

Для №9:

Направление вектора напряжения U – ось X (фаза 0).

Вектор тока I_1 через индуктивность отстаёт по фазе на угол $\psi_L = \arctan \frac{X_L}{R_k} \approx 59.05^\circ$, то есть ниже оси X .

Вектор тока I_2 через конденсатор опережает по фазе на угол $\psi_C = \arctan \frac{X_C}{R_1} \approx 66.3^\circ$, то есть выше оси X .

Суммарный ток $I = I_1 + I_2$ – направлен по оси X .

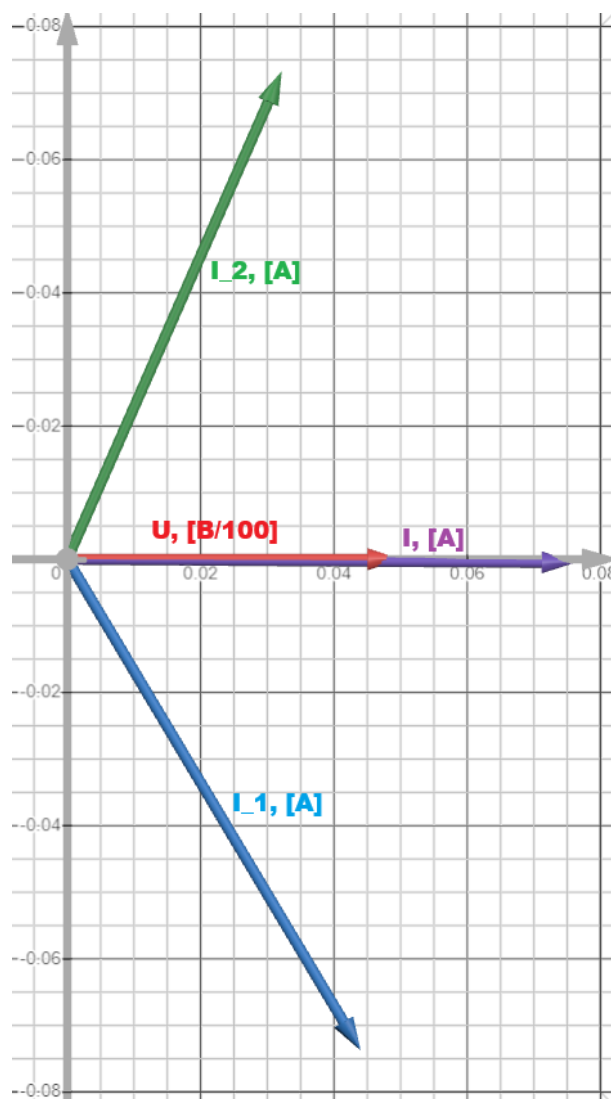


Рисунок 11 – Векторная диаграмма для состояния резонанса в схеме №9

2.6 Выводы по части 2 лабораторной работы

Во второй части лабораторной работы исследованы частотные характеристики двух цепей: последовательной RLC (схема №6) и параллельной (схема №9).

Выполнены расчёты резонансных частот, токов, напряжений и фазовых углов, построены графики и векторные диаграммы.

Для обеих схем подтверждён резонанс: в последовательной цепи – максимум тока и нулевой фазовый сдвиг, в параллельной – минимум тока и компенсация реактивных токов.

Экспериментальные данные совпадают с расчётными, что подтверждает точность моделей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе лабораторной работы было исследовано поведение линейных цепей синусоидального тока, а также особенности работы в условиях резонанса. В первой части работы была проведена оценка фазовых сдвигов и амплитудных характеристик для различных двухполюсников, что позволило детально понять взаимосвязь между входным током и напряжением. Во второй части работы были исследованы частотные характеристики для последовательных и параллельных RLC-цепей, а также исследован процесс резонанса.

Проведённый эксперимент позволил наблюдать резонансные явления, при которых ток и напряжение достигают максимума или минимума в зависимости от типа схемы. Полученные экспериментальные данные полностью совпали с теоретическими расчётами, что подтверждает правильность выбранных методов и принципов работы.

Работа дала практическое понимание процессов, происходящих в резонансных режимах, и продемонстрировала важность учета этих эффектов при проектировании и настройке электрических цепей.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Усольцев А.А. Общая электротехника: Учебное пособие. СПб: НИУ ИТМО, 2013. – 305с. – URL : [ОБЩАЯ ЭЛЕКТРОТЕХНИКА Учебные издания НИУ ИТМО](#).
2. Абдуллин А.А., Горшков К.С., Ловлин С.Ю., Поляков Н.А.,). Никитина М.В. Общая электротехника. Методические указания к лабораторному практикуму в программе LTspice : Учебно методическое пособие. - Санкт-Петербург: Университет ИТМО, 2019. - 52 с. – URL : [Общая электротехника. Методические указания к лабораторному практикуму в программе LTspice : Учебно-методическое пособие. Учебные издания НИУ ИТМО](#).
3. Параметры источника и нагрузки для выполнения лабораторной работы «Исследование линейных двухполюсников в электрических цепях однофазного синусоидального тока».