



ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

ОТЧЕТ

по лабораторной работе

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

Группа **P3332**

Вариант **091**

Выполнил(а): **Ястребов-Амирханов Алекси**

Дата сдачи отчета: **07.12.2025**

Дата защиты:

Контрольный защиты: **08.12.2025**

Количество баллов:

СПб – 2025

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

Исходные данные для выполнения лабораторной работы:

№ вар	U, В	ψ_u , градус		f, Гц	R ₁ , Ом		R _k , Ом	L _k , мГн	C, мкФ
		Часть 1	Часть 2		Часть 1	Часть 2			
091	6	0	-150	19.894	40	35	5	69.283	53.591

Часть 1

Расчёт амплитуды синусоидального напряжения:

$$U_{max} = U_D \cdot \sqrt{2} = 6 \cdot \sqrt{2} = 8.485 \text{ [В]}$$

Расчет угловой частоты:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 19.894 = 124.998 \text{ [рад/с]}$$

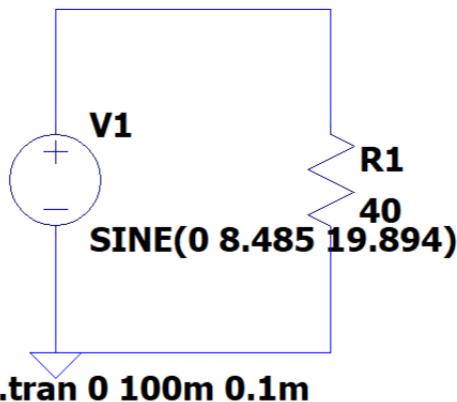
Реактивная составляющая сопротивления конденсатора:

$$X_C = 1/(\omega \cdot C) = 1/(124.998 \cdot 53.591 \cdot 10^{-6}) = 149.281 \text{ [Ом]}$$

Реактивная составляющая сопротивления катушки индуктивности:

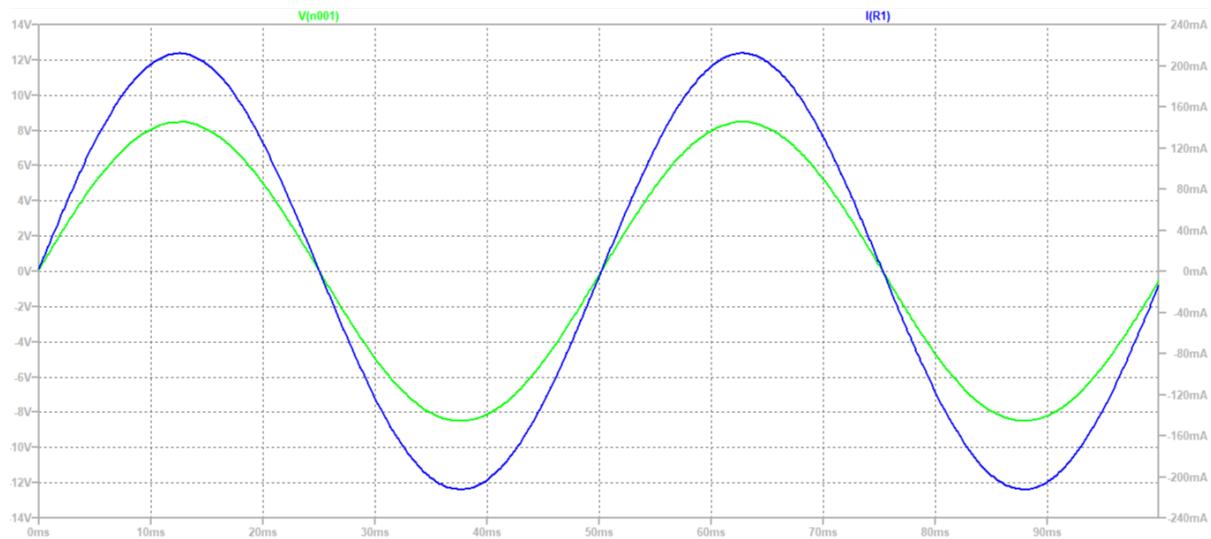
$$X_L = \omega \cdot L = 124.998 \cdot 69.283 \cdot 10^{-3} = 8.660 \text{ [Ом]}$$

Схема 1



$$\begin{aligned} U &= 6 \text{ В} \\ I &= \frac{U}{Z} = \frac{6}{40} = 0.15 \text{ А} \\ R &= R_1 = 40 \text{ Ом} \\ X &= 0 \\ Z &= R_1 = 40 \\ \varphi &= \arctg\left(\frac{X}{R}\right) = 0^\circ \end{aligned}$$

.tran 0 100m 0.1m



Зеленый график – напряжение на двухполюснике

Синий график – ток через двухполюсник

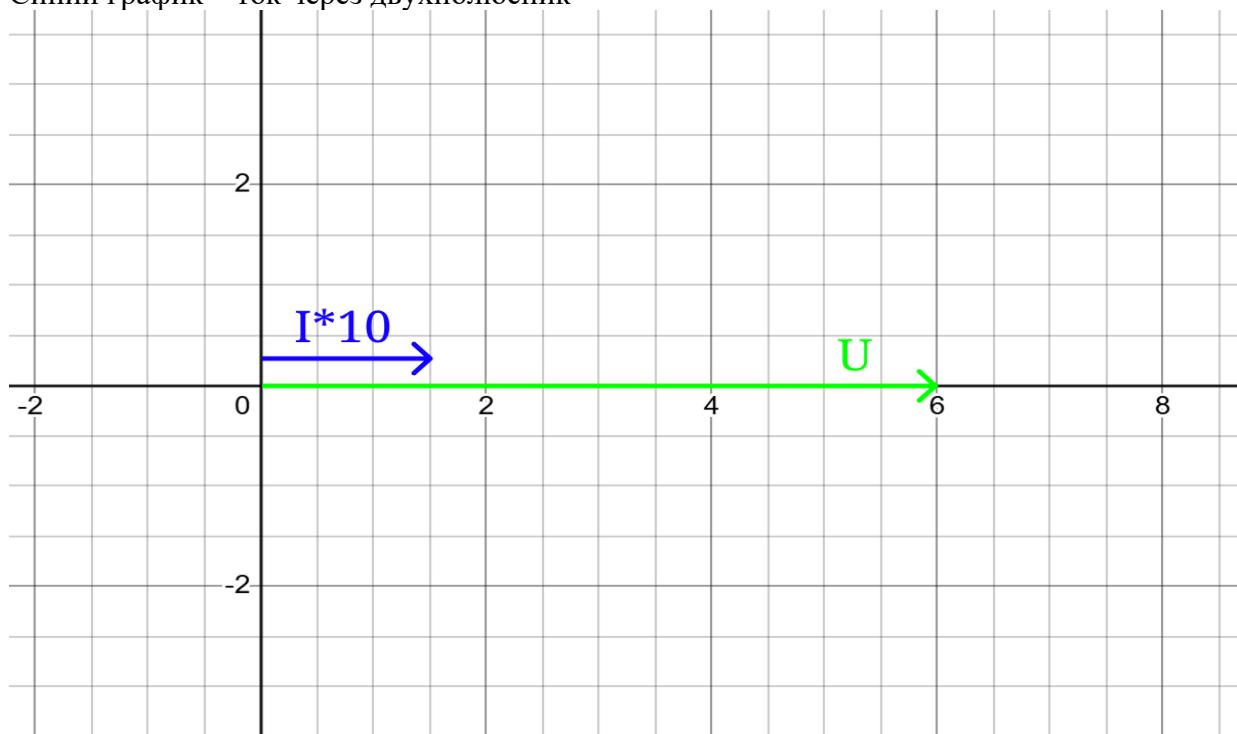
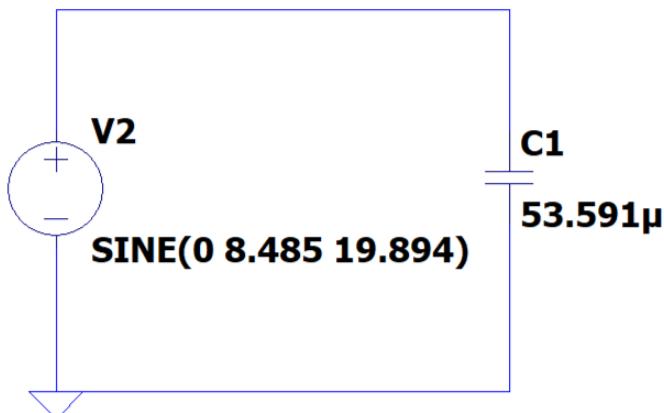


Схема 2

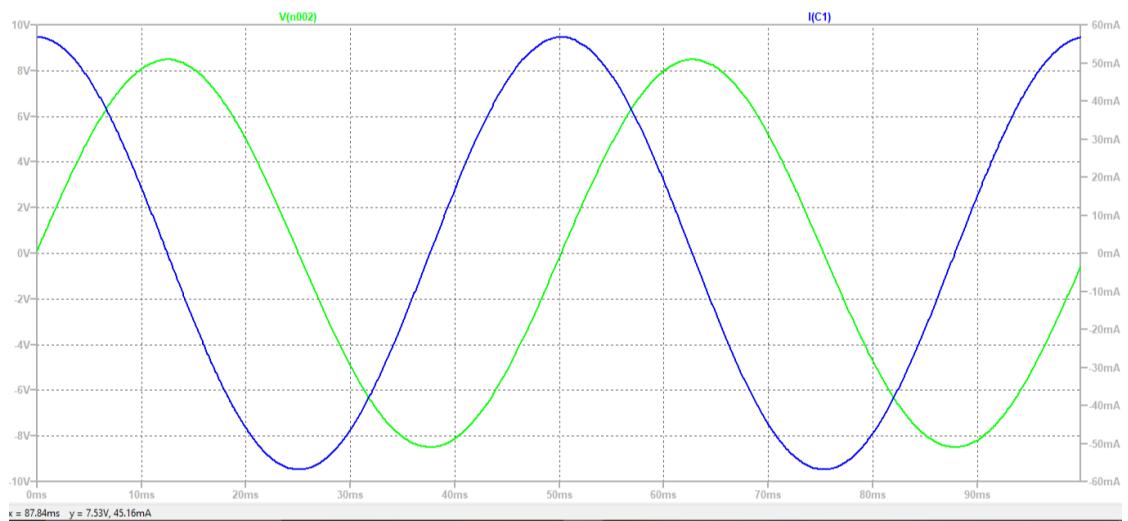


$$X = -X_C = -\frac{1}{(\omega \cdot C)} = -\frac{1}{124,998 \cdot 53,591 \cdot 10^{-6}} = -149,281$$

$$Z = X_C = 149,281$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{6}{149,281} = 0,04 A$$

$$R = 0; \quad \varphi = \arctg(-\infty) = -90^\circ$$



Зеленый график – напряжение на двухполюснике

Синий график – ток через двухполюсник

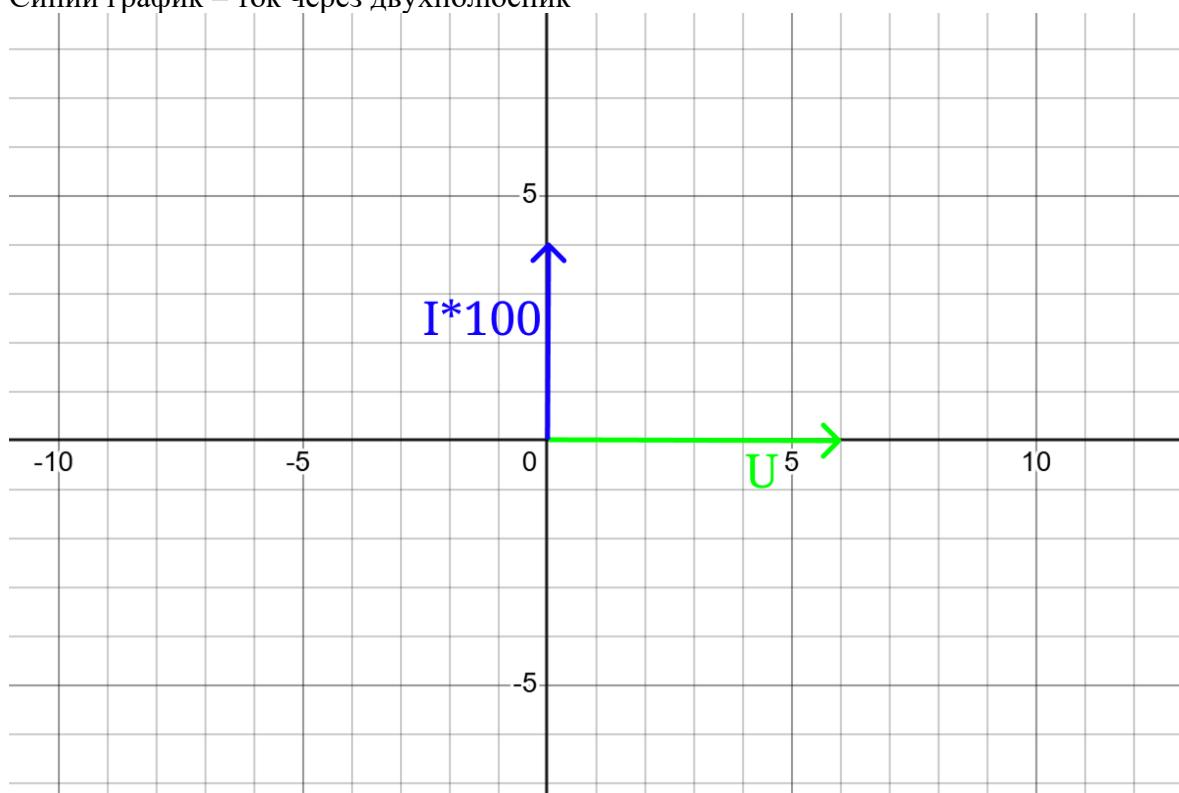
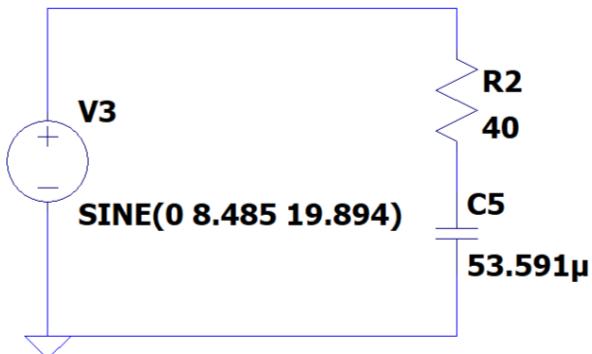


Схема 3



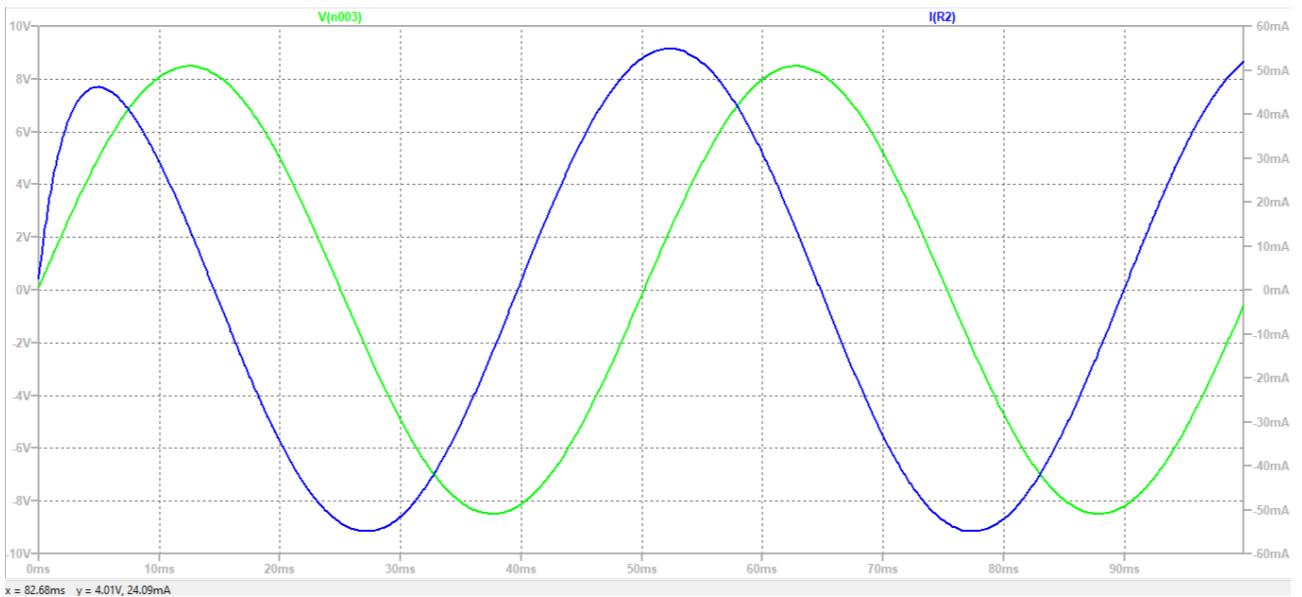
$$X = -X_C = -\frac{1}{(\omega \cdot C)} = -149,281$$

$$R = R_1 = 40 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{40^2 + (-149,281)^2} = 154,547$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{X}{R} \right) = \arctg \left(\frac{-149,281}{40} \right) = -75^\circ$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{40}{154,547} = 0,039 A$$



Зеленый график – напряжение на двухполюснике

Синий график – ток через двухполюсник

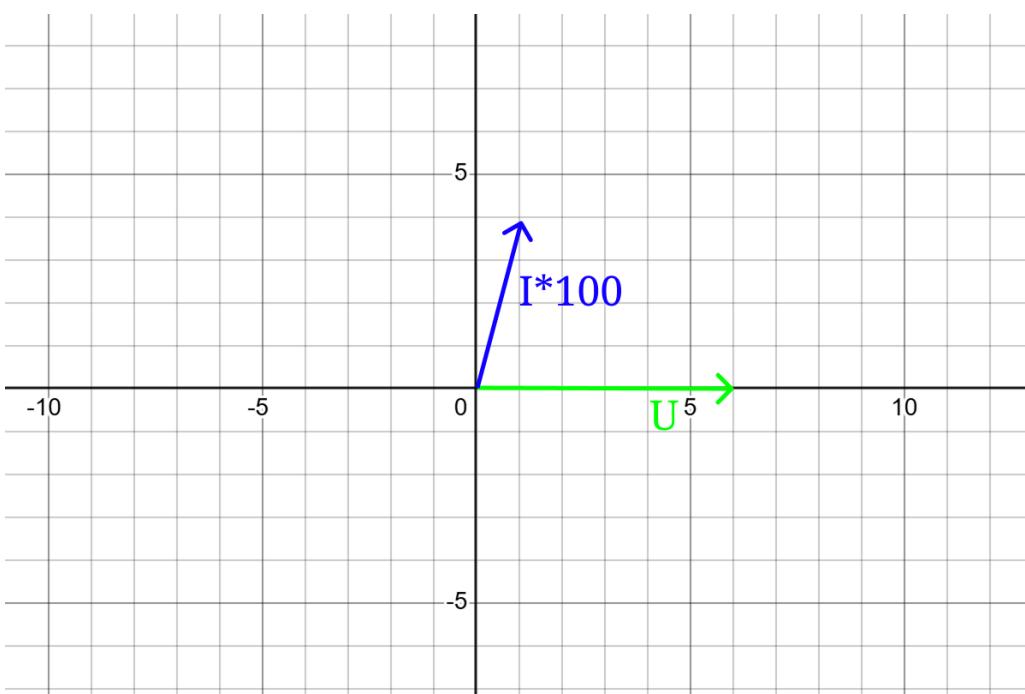
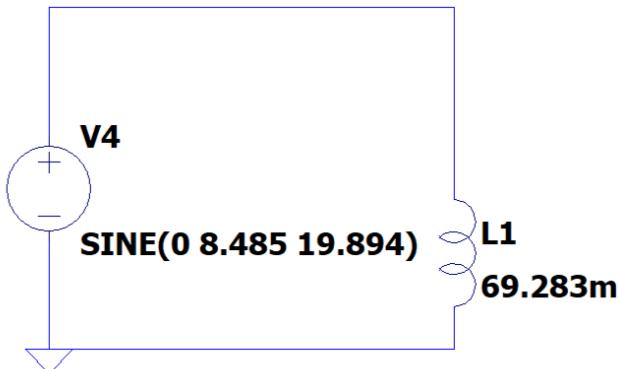
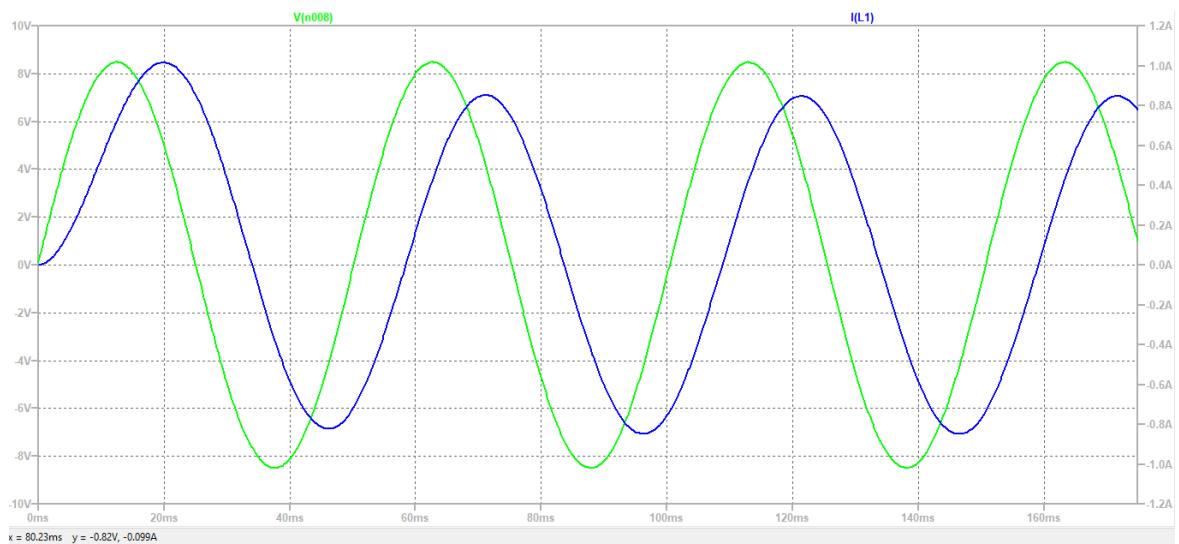


Схема 4



$$\begin{aligned}
 X &= X_L = \omega \cdot L = 8,66 \\
 R &= R_k = 5 \Omega \\
 Z &= \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{25 + 8,66^2} = 10 \\
 \varphi &= \arctg\left(\frac{X}{R}\right) = \arctg\left(\frac{8,66}{5}\right) = 59,999^\circ \\
 I &= \frac{U}{Z} = \frac{6}{10} = 0,6 \text{ A}
 \end{aligned}$$



Зеленый график – напряжение на двухполюснике
Синий график – ток через двухполюсник

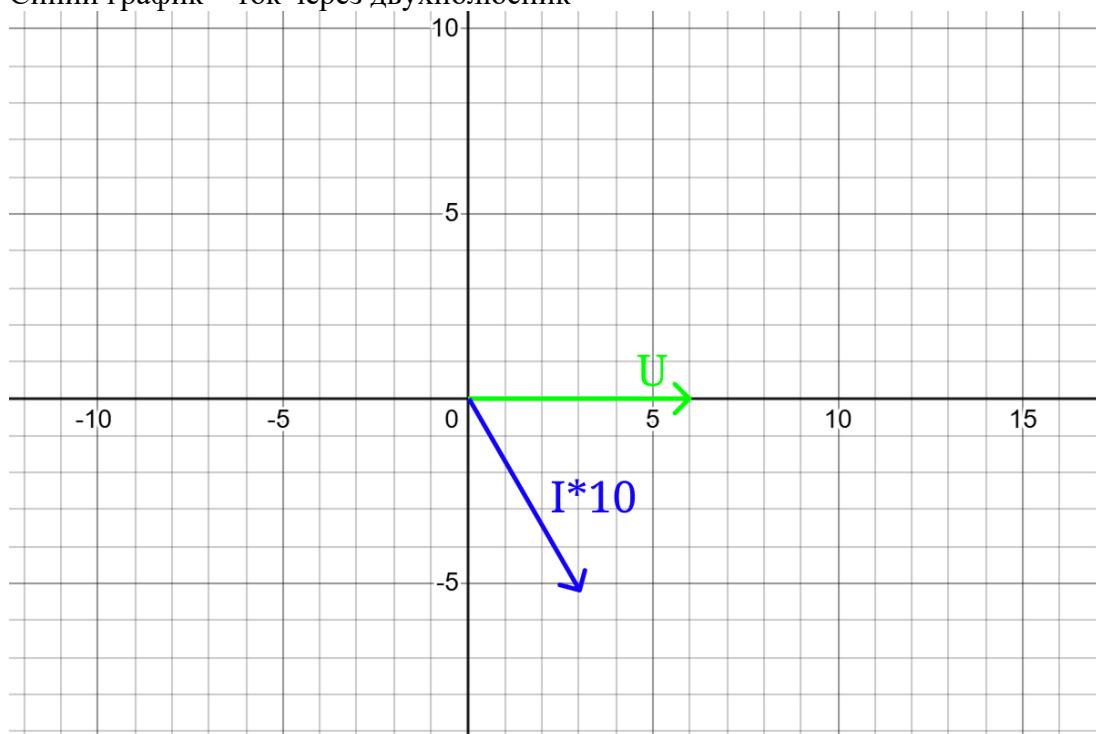
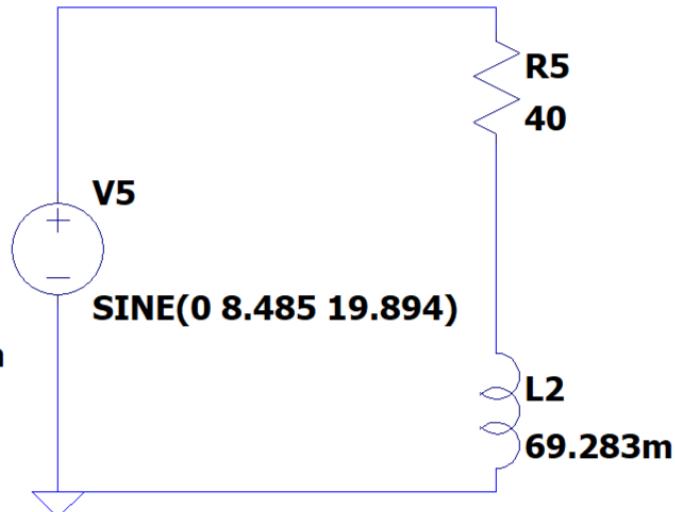


Схема 5



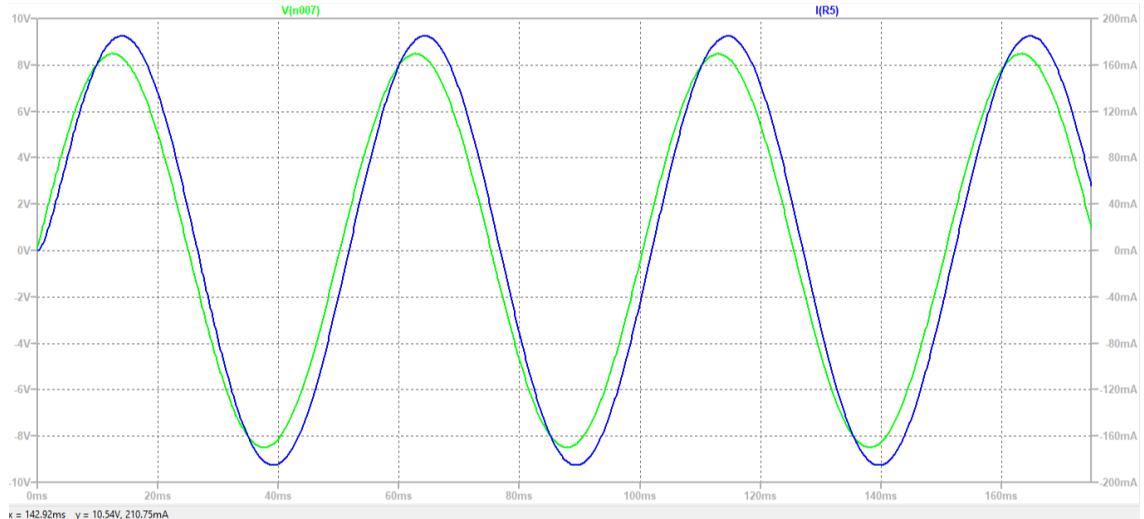
$$X = X_L = \omega \cdot L = 8,66$$

$$R = R_1 + R_k = 40 + 5 = 45 \text{ Ом}$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{45^2 + 8,66^2} = 45,826$$

$$\varphi = \arctg\left(\frac{X}{R}\right) = \arctg\left(\frac{8,66}{45}\right) = 10,893^\circ$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{6}{45,826} = 0,131 \text{ A}$$



Зеленый график – напряжение на двухполюснике
Синий график – ток через двухполюсник

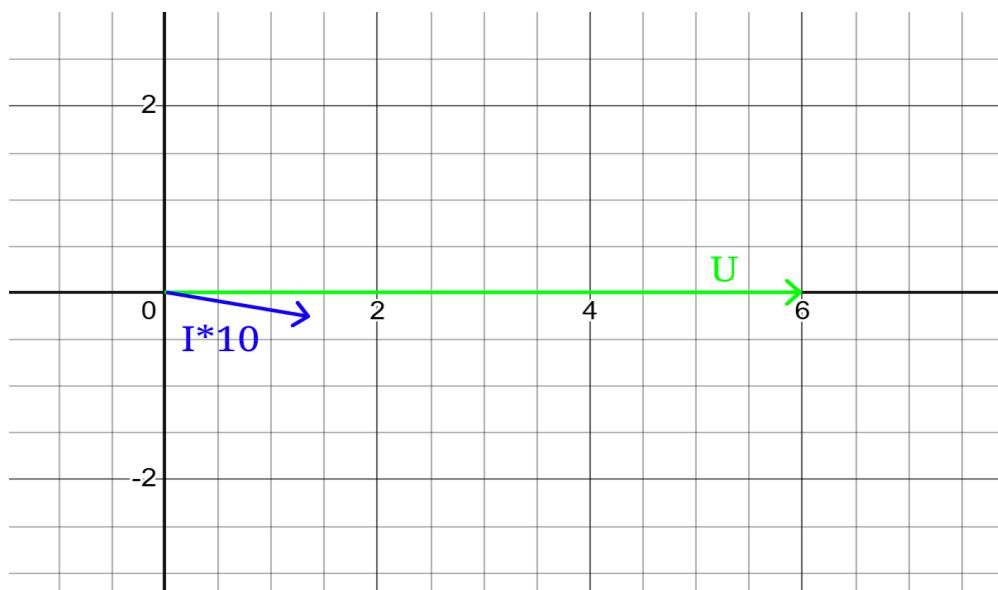
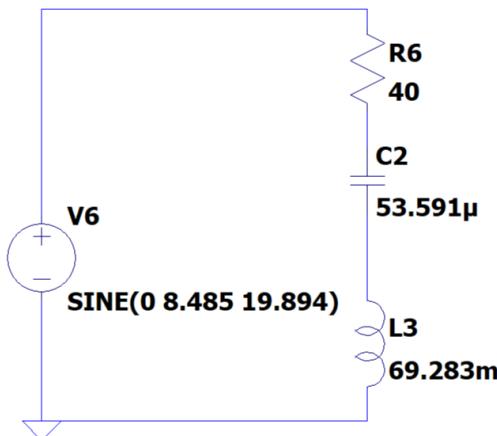


Схема 6



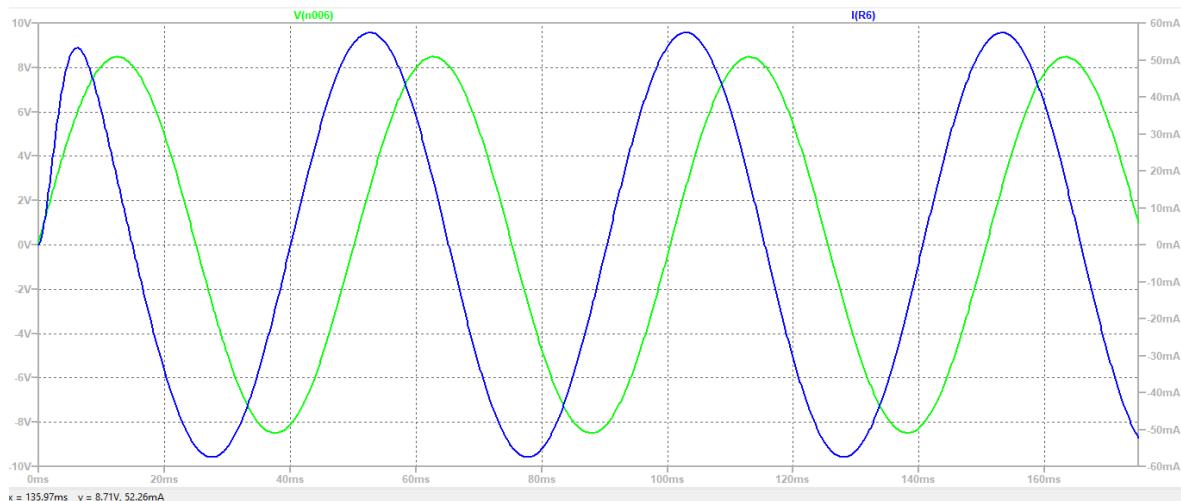
$$X = X_L - X_C = \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} = -140,621$$

$$R = R_1 + R_k = 40 + 5 = 45 \Omega$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = \sqrt{45^2 + (-140,621)^2} = 147,646$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{X}{R} \right) = \arctg \left(\frac{-140,621}{45} \right) = -72,255^\circ$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{6}{147,646} = 0,041 A$$



Зеленый график – напряжение на двухполюснике

Синий график – ток через двухполюсник

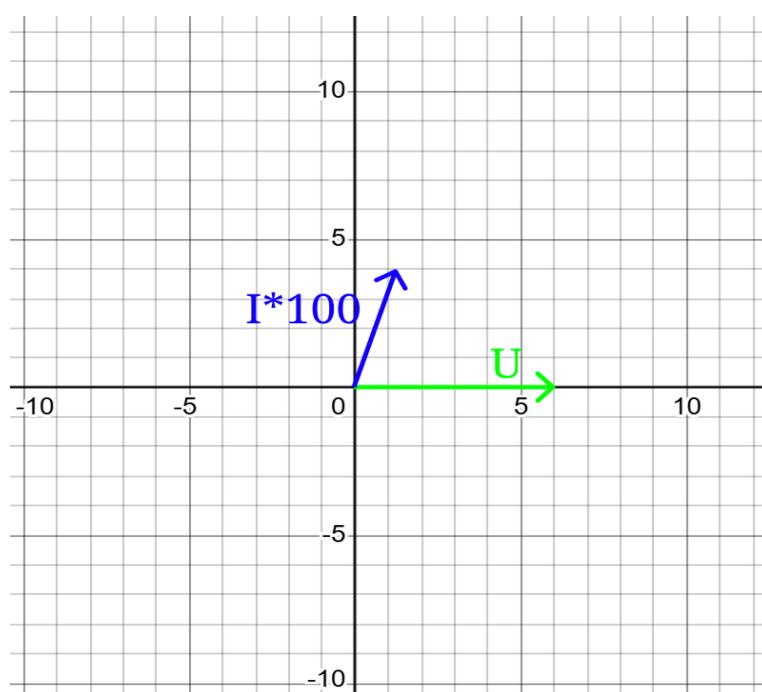
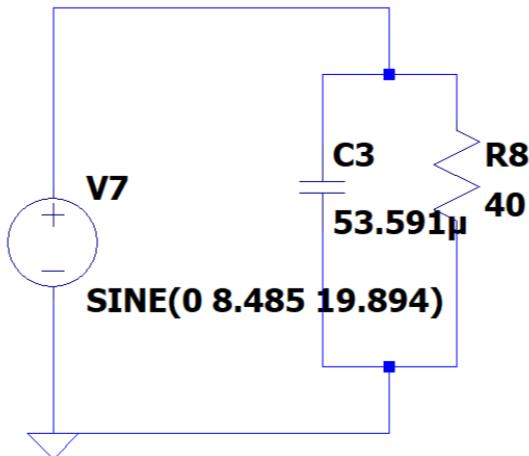


Схема 7



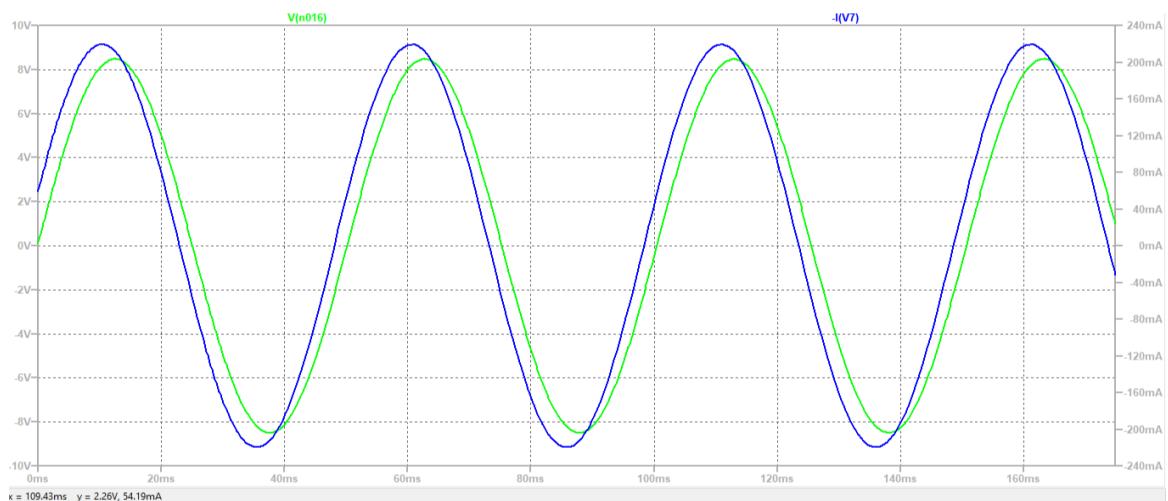
$$B = -B_C = -\omega \cdot C = -124,998 \cdot 0.000053591 = -0,007$$

$$G = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{40} = 0,025$$

$$Y = \sqrt{0,025^2 + (-0,007)^2} = 0,026$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{B}{G} \right) = \arctg \left(\frac{-0,007}{0,025} \right) = -15,642^\circ$$

$$I = U \cdot Y = 6 \cdot 0,026 = 0,156 \text{ A}$$



Зеленый график – напряжение на двухполюснике

Синий график – ток через двухполюсник

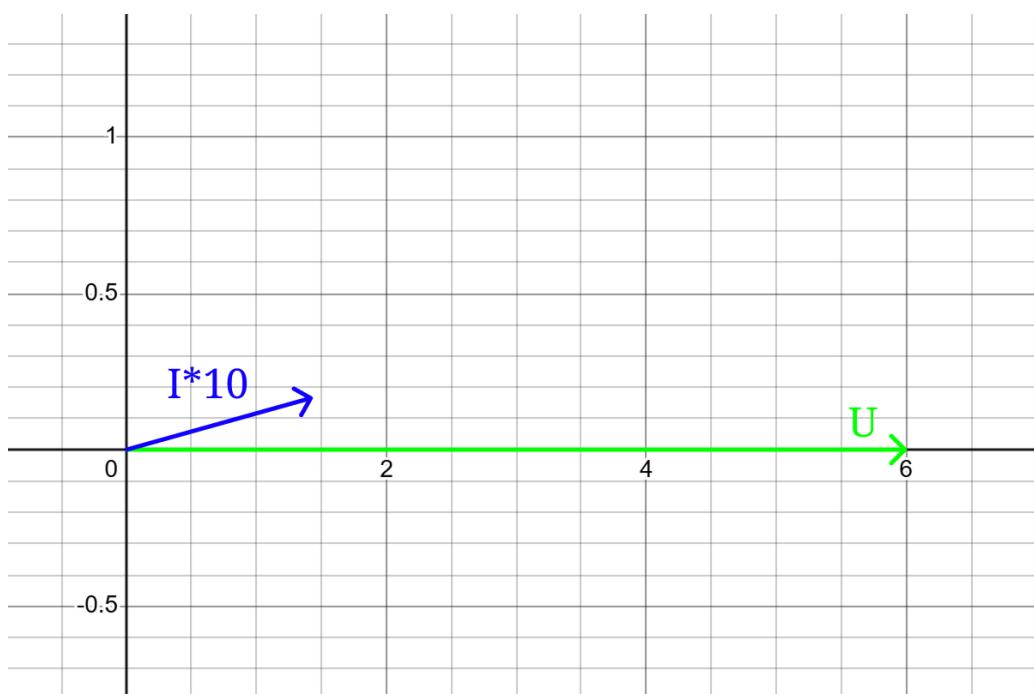
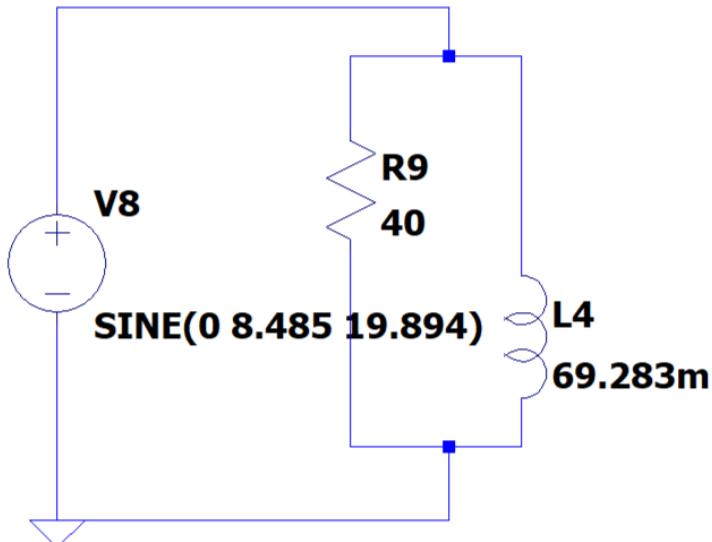


Схема 8



$$G_1 = \frac{1}{R_1} = \frac{1}{40} = 0,025$$

$$G_k = \frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{R_k}{R_k^2 + (\omega \cdot L)^2} = 0,05$$

$$B_1 = 0$$

$$B_k = \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{\omega \cdot L}{R_k^2 + (\omega \cdot L)^2} = 0,087$$

$$G = G_1 + G_k = 0,075$$

$$B = B_k - B_1 = 0,087$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{0,05^2 + 0,087^2} = 0,115$$

$$I = U \cdot Y = 6 \cdot 0,115 = 0,69 A$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{B}{G} \right) = \arctg \left(\frac{0,087}{0,075} \right) = 49,236^\circ$$



Зеленый график – напряжение на двухполюснике

Синий график – ток через двухполюсник

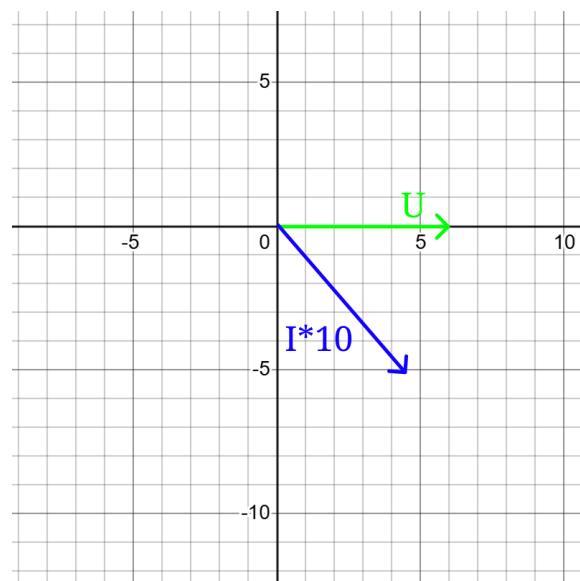
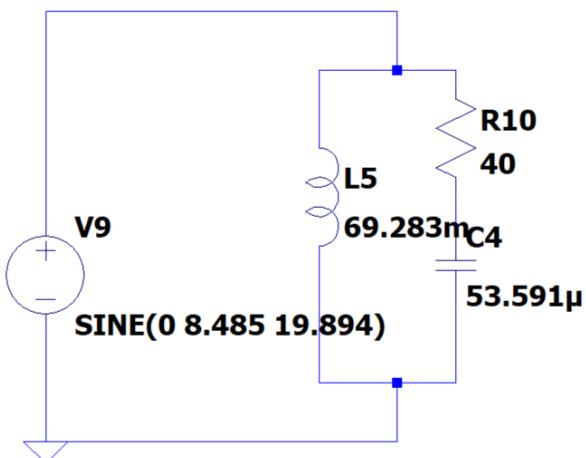


Схема 9



$$G_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_C^2} = \frac{R_1}{R_1^2 + (\frac{1}{\omega C})^2} = \frac{40}{40^2 + 149,281^2} = 0,002$$

$$G_k = \frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{R_k}{R_k^2 + (\omega \cdot L)^2} = \frac{5}{5^2 + 8,66^2} = 0,05$$

$$B_1 = \frac{X_C}{R_1^2 + X_C^2} = \frac{149,281}{40^2 + 149,281^2} = 0,006$$

$$B_k = \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{\omega \cdot L}{R_k^2 + (\omega \cdot L)^2} = \frac{8,66}{5^2 + 8,66^2} = 0,087$$

$$G = G_1 + G_k = 0,052 \text{ Ом}$$

$$B = B_k - B_1 = 0,081$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = \sqrt{0,052^2 + 0,081^2} = 0,096$$

$$I = U \cdot Y = 6 \cdot 0,096 = 0,576 \text{ A}$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{B}{G} \right) = \arctg \left(\frac{0,081}{0,052} \right) = 57,301^\circ$$



Зеленый график – напряжение на двухполюснике

Синий график – ток через двухполюсник

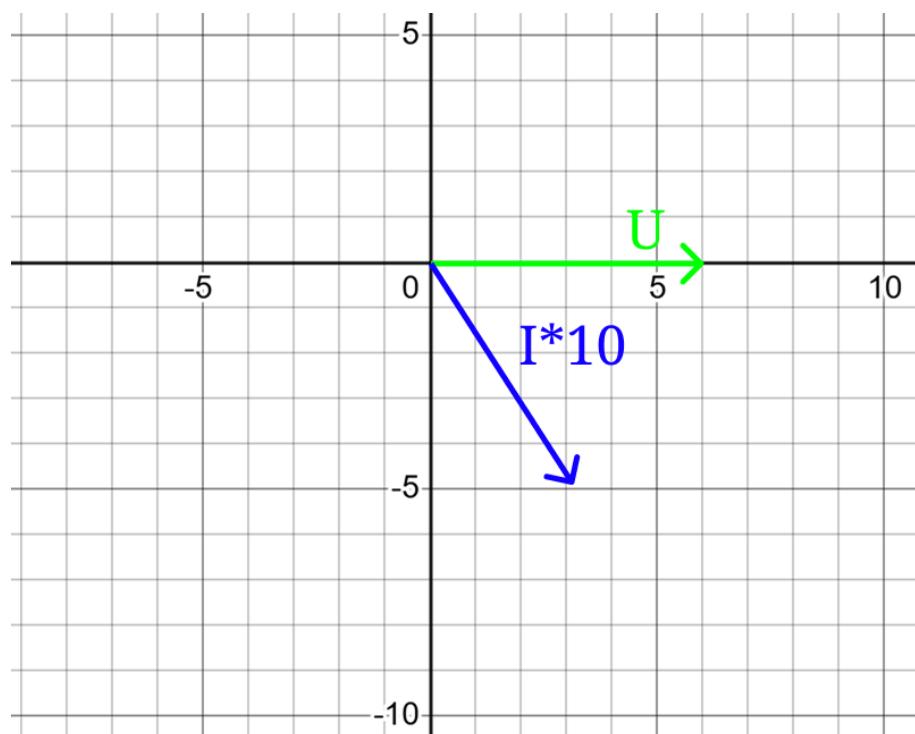


Таблица 2.2. Результаты измерений для приведенных схем двухполюсников

Номер схемы цепи	Параметры двухполюсников				Результаты измерений			Результаты вычислений	
	R ₁	R _k	L	C	U	I	φ	I	φ
	Ом		Гн	мкФ	B	A	°	A	°
1	40	-	-	-	6	0,15	0	0,15	0
2	-	-	-	53.591	6	0,04	-89,713	0,04	-90
3	40	-	-	53.591	5,999	0,039	-75,14	0,039	-75
4	-	5	69.283	-	5,998	0,603	60,011	0,6	59,999
5	40	5	69.283	-	5,999	0,131	10,887	0,131	10,893
6	40	5	69.283	53.591	5,997	0,041	-72,229	0,041	-72,255
7	40	-	-	53.591	6	0,155	-15,187	0,156	-15,642
8	40	5	69.283	-	5,999	0,691	49,149	0,69	49,236
9	40	5	69.283	53.591	5,998	0,574	57,22	0,576	57,301

Выводы по первой части

В ходе исследования различных типов двухполюсников были рассчитаны и экспериментально проверены (с помощью программы LTspice) действующие значения тока и напряжения, а также фазовый сдвиг между ними. Результаты измерений хорошо согласуются с теоретическими расчетами, незначительные расхождения объясняются погрешностями вычислений и округлениями.

Было подтверждено, что характер нагрузки определяет знак фазового сдвига:

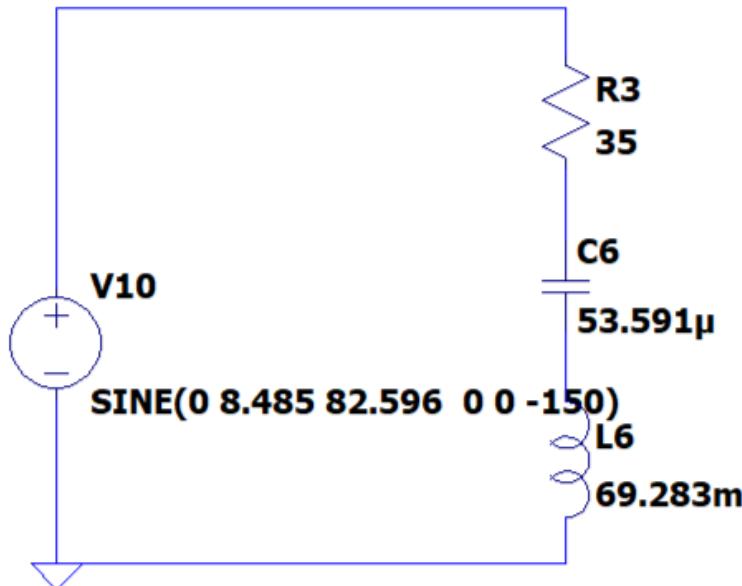
- При чисто резистивной нагрузке сдвиг фаз отсутствует ($\phi = 0^\circ$).
- Для нагрузок с индуктивным характером ток отстает от напряжения, что соответствует положительному фазовому сдвигу ($\phi > 0^\circ$).
- Для нагрузок с емкостным характером ток опережает напряжение, что соответствует отрицательному фазовому сдвигу ($\phi < 0^\circ$).

При анализе смешанных цепей, содержащих как индуктивные, так и емкостные элементы (двахполюсники №6 и №9), было установлено, что результирующий фазовый сдвиг определяется соотношением их реактивных сопротивлений (или проводимостей). В случае последовательного соединения знак ϕ зависит от того, какое из реактивных сопротивлений (индуктивное или емкостное) преобладает, поскольку активное сопротивление всегда положительно. В случае параллельного соединения на знак и величину сдвига влияет комплексная проводимость каждой ветви, что делает зависимость от параметров элементов (R, L, C) более сложной.

Таким образом, работа подтвердила основные теоретические положения о поведении пассивных двухполюсников в цепях синусоидального тока и влияние типа элементов на фазовые соотношения между током и напряжением.

Часть 2

Часть 2.1



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} = 82,596 \text{ Гц}$$

Формулы для расчета по графикам:

$$I = \frac{I_m}{\sqrt{2}}; \quad U_{R_1} = \frac{U_{R_{1m}}}{\sqrt{2}}; \quad U_K = \frac{U_{Km}}{\sqrt{2}}; \quad U_C = \frac{U_{Cm}}{\sqrt{2}}$$

Формулы для теоретического расчета:

$$I = \frac{U}{Z} = 0,15 \text{ А}$$

$$R = R_1 + R_k = 35 + 5 = 40 \text{ Ом}$$

$$\omega = 2\pi f_0 = 2 * 3,14 * 82,596 = 518,966$$

$$X = X_L - X_C = \omega \cdot L - \frac{1}{\omega \cdot C} = 0$$

$$Z = \sqrt{R^2 + X^2} = 40$$

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_L^2} = 36,302$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{X}{R} \right) = 0$$

$$U_{R_1} = I * R_1 = 5,25 \text{ В}$$

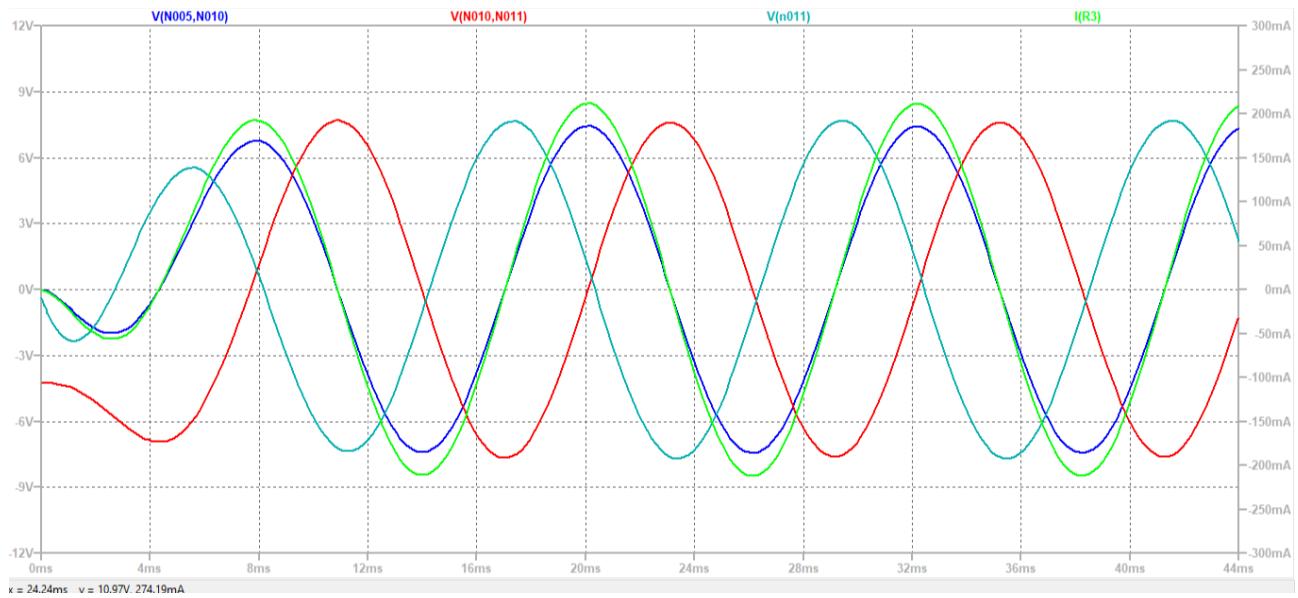
$$U_C = I * X_C = 5,393 \text{ В}$$

$$U_k = I * Z_k = 5,445 \text{ В}$$

$$Q_p = \frac{\rho}{R_1 + R_k} = \frac{35,956}{40} = 0,899$$

$$\rho = \sqrt{\frac{L}{C}} = 35,956$$

$$Q_e = \frac{U_{C_0}}{U} = 0,899$$



Бирюзовый график – напряжение на индуктивности
 Красный график – напряжение на емкости
 Синий график – напряжение на резисторе
 Зеленый график – сила тока на входе двухполюсника

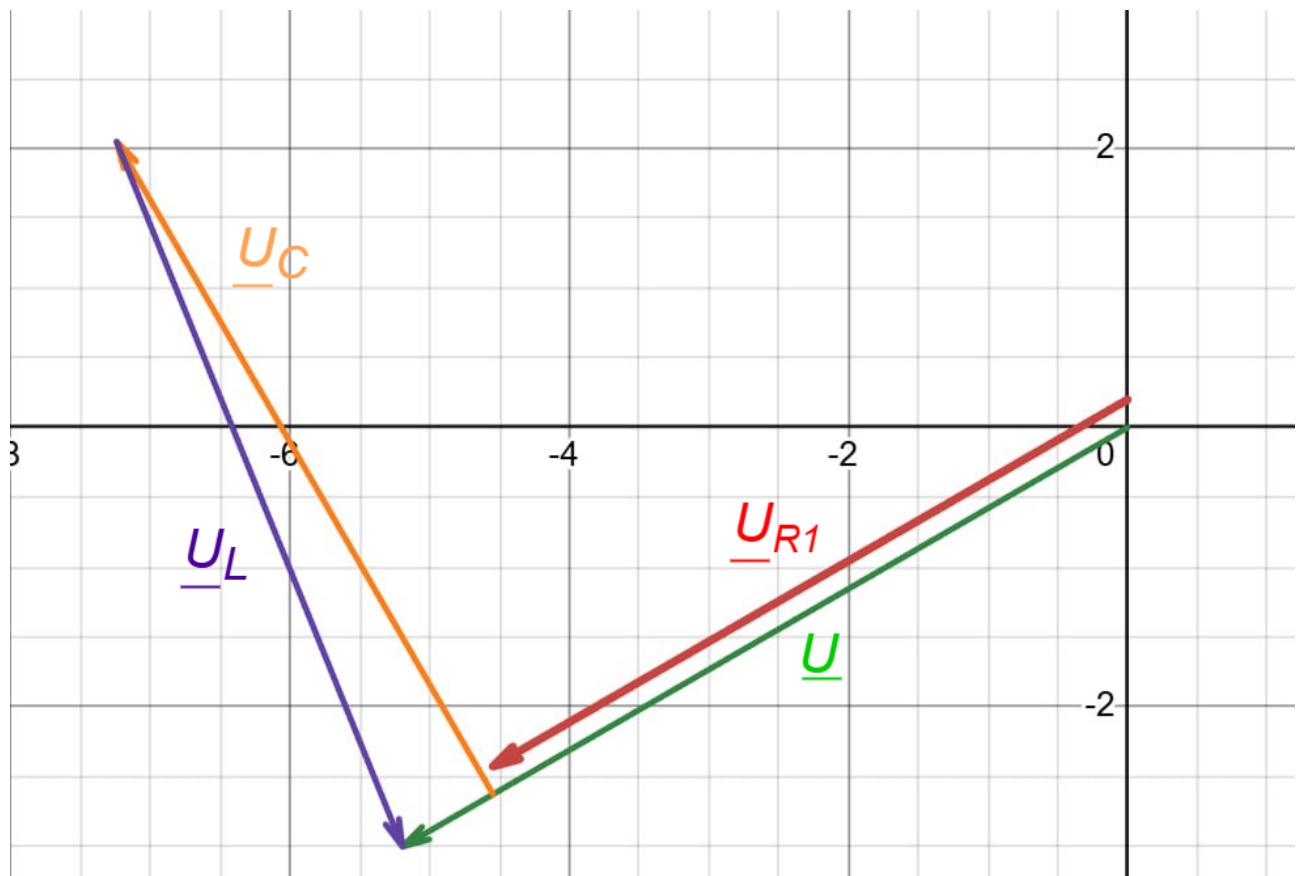
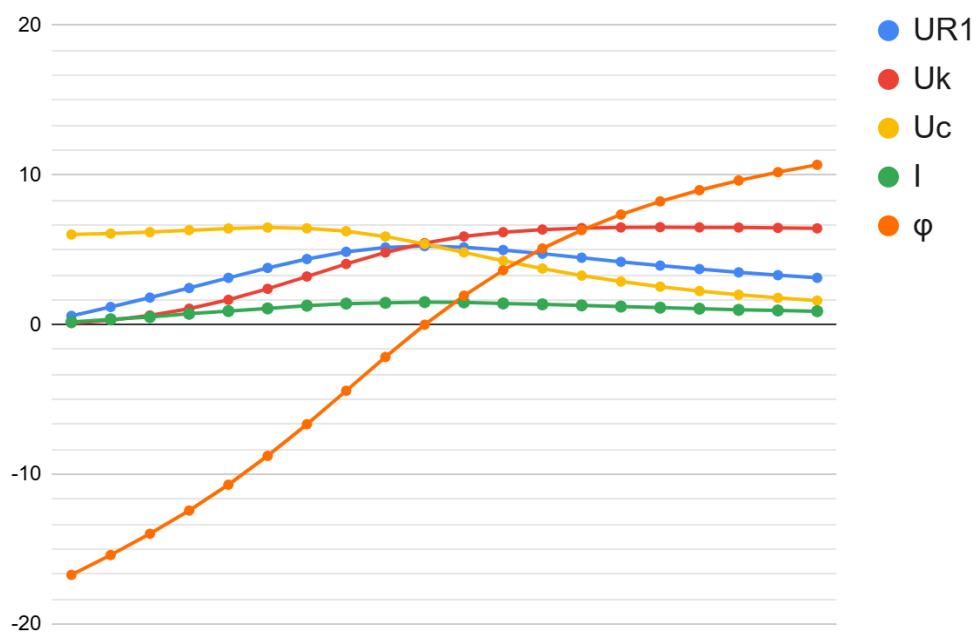


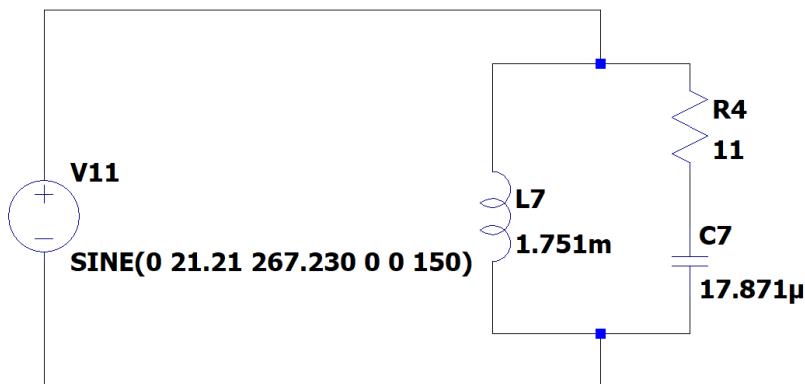
Таблица 2.3. Результаты измерений и расчетов в заданном диапазоне частот

f	$U = 6 \text{ В}; R_1 = 35 \Omega; R_k = 5 \Omega; L = 69,283 \text{ мГн}; C = 53,591 \text{ мкФ}; f_0 = 82,596 \text{ Гц}$									
	Расчёт					Эксперимент				
	$Q_p = 0,899$					$Q_e = 0,899$				
Гц	φ	I	U_{R_1}	U_k	U_C	φ	I	U_{R_1}	U_k	U_C
Гц	°	A	B			°	A	B		
0.1 · f_0	-83,592	0,017	0,586	0,103	6,023	-83,587	0,018	0,589	0,106	6,027
0.2 · f_0	-76,958	0,034	1,185	0,296	6,089	-76,963	0,036	1,183	0,299	6,092
0.3 · f_0	-69,871	0,052	1,807	0,613	6,190	-69,866	0,051	1,811	0,616	6,186
0.4 · f_0	-62,104	0,070	2,456	1,068	6,312	-62,110	0,073	2,452	1,071	6,316
0.5 · f_0	-53,461	0,089	3,126	1,666	6,425	-53,456	0,091	3,130	1,662	6,429
0.6 · f_0	-43,827	0,108	3,788	2,395	6,488	-43,831	0,109	3,793	2,398	6,492
0.7 · f_0	-33,260	0,125	4,390	3,217	6,446	-33,255	0,127	4,387	3,221	6,442
0.8 · f_0	-22,070	0,139	4,865	4,056	6,251	-22,075	0,141	4,869	4,059	6,248
0.9 · f_0	-10,796	0,147	5,157	4,822	5,890	-10,801	0,146	5,160	4,827	5,893
1 · f_0	0,000	0,150	5,250	5,443	5,396	-0,004	0,151	5,254	5,447	5,392
1.1 · f_0	9,686	0,148	5,175	5,892	4,836	9,690	0,149	5,170	5,897	4,833
1.2 · f_0	18,194	0,143	4,988	6,186	4,272	18,198	0,142	4,991	6,182	4,269
1.3 · f_0	25,462	0,135	4,740	6,363	3,748	25,466	0,136	4,744	6,359	3,751
1.4 · f_0	31,609	0,128	4,471	6,459	3,283	31,603	0,129	4,474	6,455	3,280
1.5 · f_0	36,799	0,120	4,204	6,502	2,881	36,804	0,121	4,201	6,499	2,884
1.6 · f_0	41,199	0,113	3,950	6,514	2,538	41,203	0,114	3,947	6,518	2,541
1.7 · f_0	44,951	0,106	3,715	6,507	2,246	44,947	0,107	3,719	6,503	2,249
1.8 · f_0	48,177	0,100	3,501	6,490	1,999	48,182	0,099	3,497	6,494	2,002
1.9 · f_0	50,972	0,094	3,306	6,467	1,788	50,976	0,095	3,309	6,470	1,792
2 · f_0	53,414	0,089	3,129	6,441	1,608	53,419	0,090	3,133	6,437	1,612

Графики зависимости величин от частоты для схемы №6



Часть 2.2



$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \sqrt{\frac{\rho^2 - R_k^2}{\rho^2 - R_1^2}} = \frac{1}{2 * 3.14 * \sqrt{0,069283 * 0,000053591}} \sqrt{\frac{35,956^2 - 5^2}{35,956^2 - 35^2}} \approx 357,082 \text{ Гц}$$

$$\omega = 2\pi f_0 = 2243,612$$

Формулы для теоретического расчета:

$$I = U * Y = 0,162 \text{ A}$$

$$X_C = \frac{1}{\omega * C} = 8,317$$

$$X_L = \omega * L = 155,444$$

$$Z_C = \sqrt{R_1^2 + X_C^2} = 35,975$$

$$Z_L = \sqrt{R_k^2 + X_L^2} = 155,524$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_C} = 0,167$$

$$I_2 = \frac{U}{Z_L} = 0,039$$

$$G_1 = \frac{R_1}{R_1^2 + X_C^2} = \frac{R_1}{R_1^2 + (\frac{1}{\omega \cdot C})^2} = 0,027$$

$$G_k = \frac{R_k}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{R_k}{R_k^2 + (\omega \cdot L)^2} = 0$$

$$G = G_1 + G_k = 0,027$$

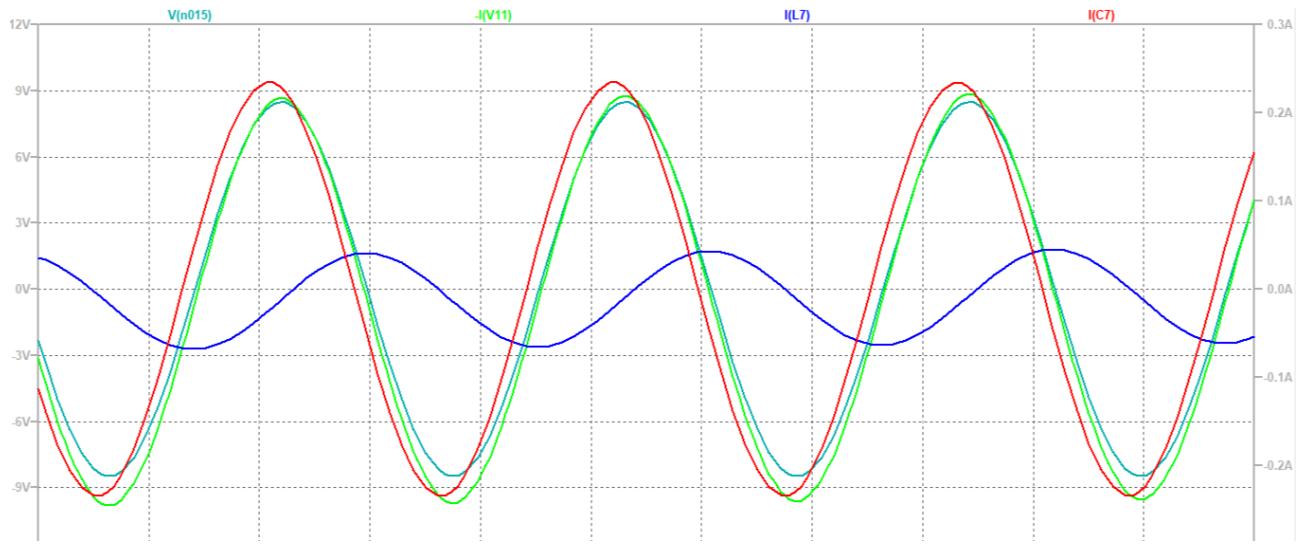
$$B_1 = \frac{X_C}{R_1^2 + X_C^2} = 0,006$$

$$B_k = \frac{X_L}{R_k^2 + X_L^2} = \frac{\omega \cdot L}{R_k^2 + (\omega \cdot L)^2} = 0,006$$

$$B = B_k - B_1 = 0$$

$$Y = \sqrt{G^2 + B^2} = 0,027$$

$$\varphi = \arctg \left(\frac{B}{G} \right) = 0$$



Бирюзовый график – напряжение на двухполюснике

Красный график – сила тока на емкости

Синий график – сила тока на индуктивности

Зеленый график – сила тока на двухполюснике

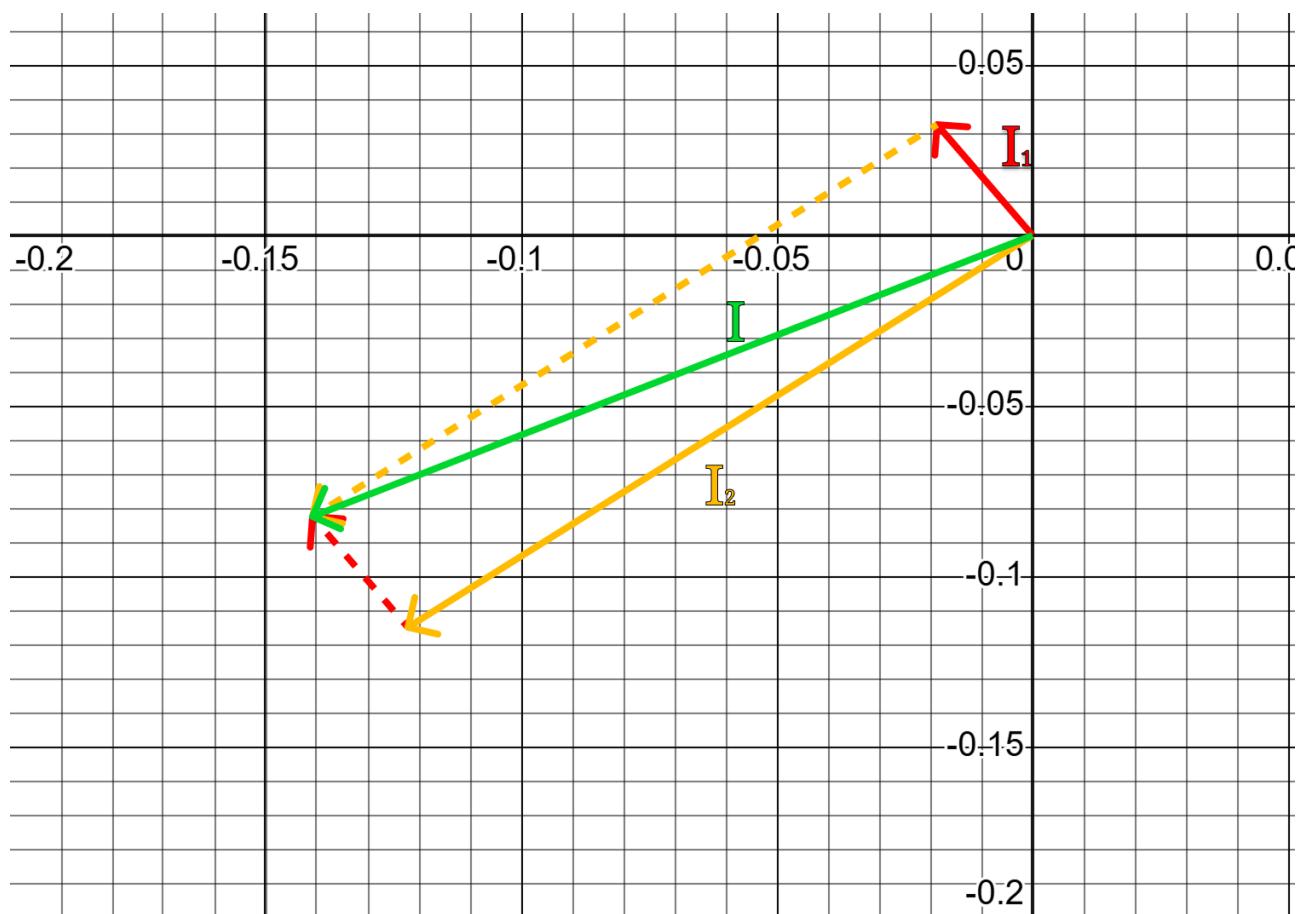
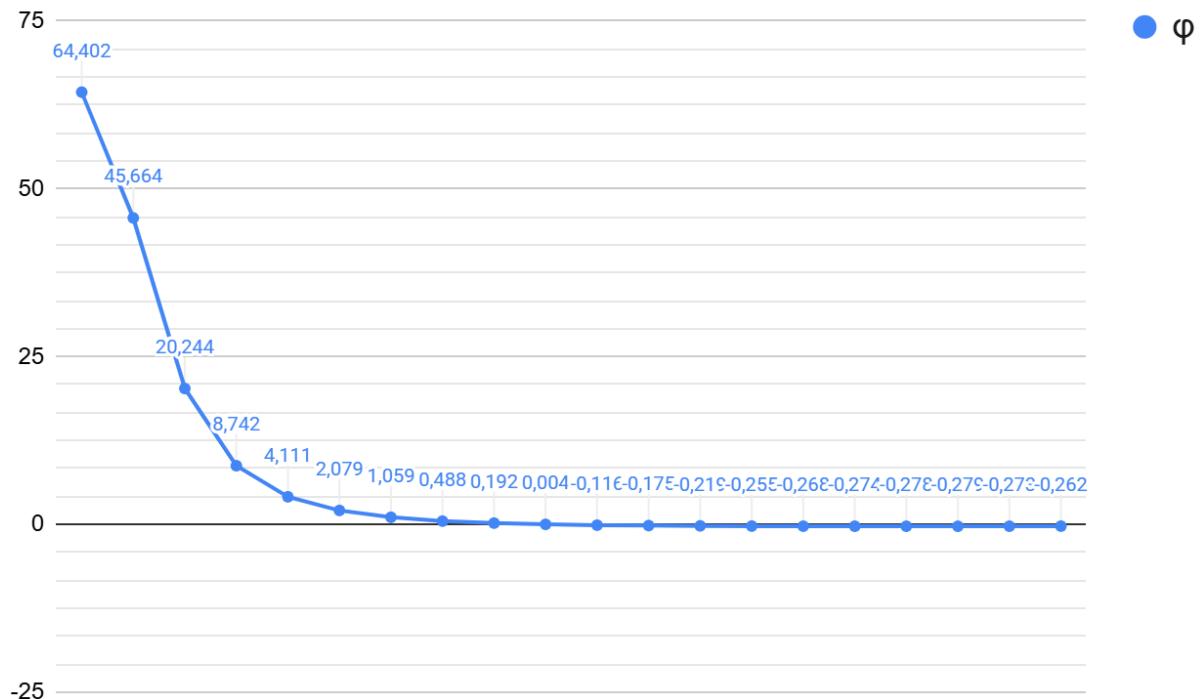


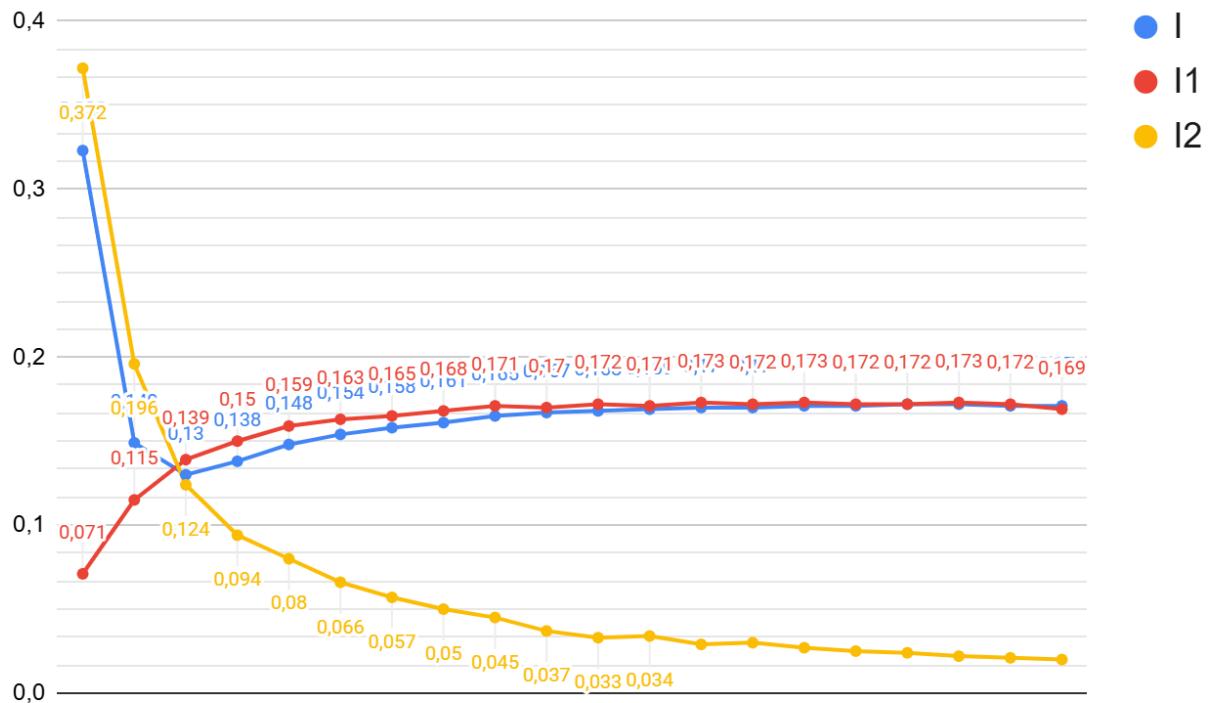
Таблица 2.4. Результаты измерений и расчетов в заданном диапазоне частот

f Гц	U = 6 В; R1 = 35 Ом; Rk = 5 Ом; L = 69.283 мГн; C = 53.591 мкФ; f0 = 357,082				Расчёт Эксперимент			
	φ	I	I1	I2	φ	I	I1	I2
	°	A			°	A		
0.1 · f0	64,387	0,320	0,066	0,368	64,402	0,323	0,071	0,372
0.2 · f0	45,682	0,145	0,110	0,191	45,664	0,149	0,115	0,196
0.3 · f0	20,222	0,127	0,134	0,128	20,244	0,130	0,139	0,124
0.4 · f0	8,728	0,136	0,147	0,096	8,742	0,138	0,150	0,094
0.5 · f0	4,124	0,145	0,155	0,077	4,111	0,148	0,159	0,080
0.6 · f0	2,066	0,152	0,159	0,064	2,079	0,154	0,163	0,066
0.7 · f0	1,046	0,156	0,162	0,055	1,059	0,158	0,165	0,057
0.8 · f0	0,497	0,159	0,164	0,048	0,488	0,161	0,168	0,050
0.9 · f0	0,186	0,162	0,166	0,043	0,192	0,165	0,171	0,045
1 · f0	0,000	0,163	0,167	0,039	0,004	0,167	0,170	0,037
1.1 · f0	-0,111	0,165	0,168	0,035	-0,116	0,168	0,172	0,033
1.2 · f0	-0,180	0,166	0,168	0,032	-0,175	0,169	0,171	0,034
1.3 · f0	-0,223	0,167	0,169	0,030	-0,219	0,170	0,173	0,029
1.4 · f0	-0,249	0,167	0,169	0,028	-0,255	0,170	0,172	0,030
1.5 · f0	-0,263	0,168	0,169	0,026	-0,268	0,171	0,173	0,027
1.6 · f0	-0,271	0,168	0,170	0,024	-0,274	0,171	0,172	0,025
1.7 · f0	-0,274	0,169	0,170	0,023	-0,278	0,172	0,172	0,024
1.8 · f0	-0,274	0,169	0,170	0,021	-0,279	0,172	0,173	0,022
1.9 · f0	-0,271	0,169	0,170	0,020	-0,273	0,171	0,172	0,021
2 · f0	-0,267	0,169	0,170	0,019	-0,262	0,171	0,169	0,020

Графики зависимости фазы от частоты для схемы №9



Графики зависимости силы тока от частоты для схемы №9



Вывод:

В ходе выполнения лабораторной работы были подробно изучены процессы, происходящие в последовательных и параллельных RLC-цепях при воздействии синусоидального тока. Проведённые расчёты и моделирование позволили проследить, как изменяются токи, напряжения и фазовые углы в зависимости от частоты питания, и выявить условия наступления резонанса.

Для последовательного контура было показано, что при совпадении индуктивного и емкостного реактивных сопротивлений суммарное сопротивление цепи становится минимальным и определяется только активной частью. В этот момент ток принимает наибольшее значение, а разность фаз между напряжением и током исчезает. При отклонении частоты от резонансной характер цепи постепенно переходит от емкостного к индуктивному или наоборот.

В параллельном колебательном контуре наблюдалась противоположная картина: на резонансной частоте общий ток, забираемый цепью от источника, уменьшается вследствие компенсации токов в индуктивной и емкостной ветвях, что соответствует максимальному входному импедансу. Анализ также позволил увидеть влияние параметров элементов (R , L , C) на добротность и резонансные свойства схемы.

Теоретические данные, полученные в ходе расчётов, подтвердились экспериментальными результатами моделирования в LTspice, что ещё раз демонстрирует правильность законов, описывающих резонансные процессы в электрических цепях.