

# Лабораторная работа №1

## Синусоидальный ток в цепи с последовательным соединением участков $r, L, C$

### Цель работы

Теоретическое и экспериментальное исследование линейной разветвлённой цепи переменного тока.

### Теоретические сведения

#### 1. Реактивные сопротивления $X_L$ и $X_C$ и угол сдвига фаз $\varphi$

Уравнения электрического равновесия напряжений и токов цепи синусоидального тока можно записать в аналитической форме и представить графически в виде векторных диаграмм.

При анализе цепей синусоидального тока необходимо иметь в виду следующее:

– реактивное *индуктивное* сопротивление  $X_L$  индуктивной катушки и реактивное *ёмкостное*  $X_C$  сопротивление конденсатора зависят от частоты  $f$  источника синусоидального напряжения  $u = U_m \sin(2\pi ft + \Psi_u)$ , т. е.

$$X_L = \omega L = 2\pi fL \text{ и } X_C = 1/(\omega C) = 1/(2\pi fC),$$

где  $\omega = 2\pi f$  – угловая частота напряжения, рад/с;  $f = 1/T$  – циклическая частота, Гц;  $T$  – период синусоидального напряжения, с;  $\Psi_u$  – его начальная фаза, рад или град;

– в ветвях с реактивными элементами  $L$  и  $C$  между напряжением и током

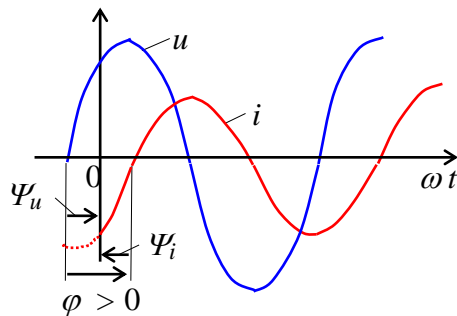


Рис.1

возникает *фазовый сдвиг*  $\varphi = \Psi_u - \Psi_i$ , где  $\Psi_i$  – начальная фаза тока (рис. 1). Угол  $\varphi$  (в рад или град) – алгебраическая величина, изменяющаяся в диапазоне от  $-90^\circ$  ( $-\pi/2$  рад) до  $+90^\circ$  ( $+\pi/2$  рад). Знак и величина угла зависят от типа и величины параметров последовательно соединённых элементов  $R, L$  и  $C$  ветви и частоты  $f$  напряжения.

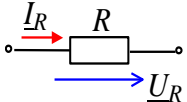
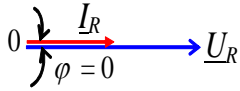
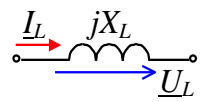
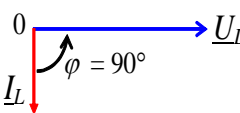
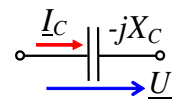
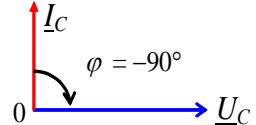
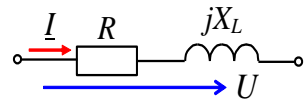
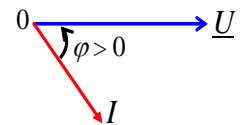
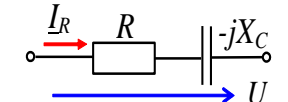
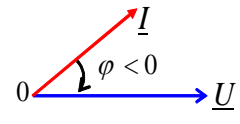
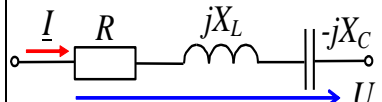
#### 2. Векторные диаграммы напряжений и тока в $RL$ -, $RC$ - и $RLC$ -ветвях

В табл. 1 представлены типовые ветви схемы цепи синусоидального тока, векторные диаграммы напряжений и токов ветвей и углы сдвига фаз  $\varphi$  между их векторами. Анализ векторных диаграмм показывает, что *резистивный* элемент  $R$  является частотно-независимым элементом: ток и напряжение на его зажимах *совпадают по фазе* (форма тока  $i_R$  повторяет форму напряжения  $u_R$ ), поэтому при определении (по осциллограммам) угла сдвига фаз между

напряжением и током в ветвях цепи в качестве датчика тока обычно используют резистор с сопротивлением  $R_0$ , напряжение  $u_{R0} = R_0 i$  с зажимов которого подаётся на один из входов осциллографа.

В индуктивном элементе ток *отстаёт по фазе* от напряжения на  $90^\circ$ , а в ёмкостном – его *опережает* на  $90^\circ$ . В  $RL$ -,  $RC$ - и  $RLC$ -ветвях углы сдвига фаз зависят от значений параметров элементов ветвей и определяются, в общем случае, по формуле  $\varphi = \arctg(X_L - X_C)/R$ .

Таблица 1

Номер ветви (рис. 3)	Элементы ветви	Векторная диаграмма	Угол $\varphi = \Psi_u - \Psi_i$
1			$\varphi = 0$
2			$\varphi = 90^\circ (\pi/2)$
3			$\varphi = -90^\circ (-\pi/2)$
4			$\varphi = \arctg(X_L/R)$
5			$\varphi = \arctg(-X_C/R)$
6		а) $X_L > X_C$ ; см. ветвь 4; б) $X_L < X_C$ ; см. ветвь 5; в) $X_L = X_C$ ; см. ветвь 1	$\varphi = \arctg[(X_L - X_C)/R]$

### 3. ИЗМЕРЕНИЕ УГЛА $\varphi$

Значение угла сдвига фаз  $\varphi$  в ветвях схемы цепи определяют косвенным методом, измеряя временные интервалы на осциллограммах, т. е.

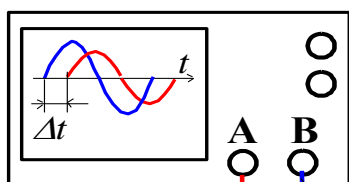


Рис. 2

$$|\varphi| = 360^\circ \Delta t / T,$$

где  $\Delta t$  – временной интервал (рис. 2) между нулевыми значениями синусоид напряжения (синего цвета) и тока (красного цвета); угол  $\varphi$  берется со знаком "плюс", если ток *отстаёт по фазе* от напряжения (см. рис. 2), и со знаком "минус", если ток *опережает по фазе* напряжение.

При измерении интервала времени  $\Delta t$  целесообразно использовать визирные линии (визеры), расположенные слева и справа экрана осциллографа (см.

рис. 4), на вход канала **A** которого будем подавать напряжение  $u_{R0}$ , пропорциональное току ветви (цвет провода 1 – красный), а на вход канала **B** – напряжение  $u$  ветви (цвет провода 2 – синий).

В библиотеке инструментов среды MS11 имеется виртуальный ваттметр **XWM** (см. рис. 3 и рис. 4), который измеряет как активную мощность  $P = UI \cos \varphi$ , потребляемую приёмником, так и коэффициент мощности (**Power Factor**)  $\cos \varphi = P/UI$ , где  $U$  и  $I$  – напряжение и ток потребителя энергии. Тогда модуль угла сдвига фаз между напряжением и током

$$\varphi = \arccos(P/UI).$$

Знак угла  $\varphi$  определяют косвенным методом, например, подключая параллельно нагрузке конденсатор: если при этом коэффициент мощности  $\cos \varphi$  увеличился (угол  $\varphi$  уменьшился), то угол  $\varphi$  имеет знак "+", и наоборот.

### Учебные задания и методические указания к их выполнению

**Задание 1.** Рассчитать индуктивное сопротивление  $X_L$  катушки и ёмкостное сопротивление  $X_C$  конденсатора при частотах, указанных в табл. 2, и занести полученные значения сопротивлений в табл. 2.

Значения индуктивности катушки и ёмкости конденсатора **определить** по формулам:  $L = 100 - 2,5N$ , мГн,  $C = 100 + 10N$ , мкФ, где  $N$  – номер записи фамилии студента в учебном журнале группы.

Таблица 2

Сопротивление $X$		при частоте $f$ , Гц						
		30	40	50	60	80	100	120
Рассчитано	$X_L$ , Ом							
Измерено	$U$ , В							
	$I$ , А							
	$X_L$ , Ом							
Рассчитано	$X_C$ , Ом							
Измерено	$U$ , В							
	$I$ , А							
	$X_C$ , Ом							

**Построить** (на одном рисунке) графики  $X_L(f)$  и  $X_C(f)$ . **Отметить** координаты точки пересечения графиков – возможного режима резонанса напряжений при последовательном соединении катушки и конденсатора между собой и с источником синусоидального напряжения.

**Задание 2.** Запустить MS11. Открыть файл **lab4.ms11** со схемой цепи синусоидального тока (рис. 3), или собрать схему цепи на рабочем поле среды MS11 и установить:

- красный цвет провода, подходящего к каналу **A** осциллографа, и синий для провода, подходящего к каналу **B** осциллографа;
- параметры пассивных элементов:  
 $R_0 = 1 \text{ мОм}$ ;  $R_1 = R_4 = R_5 = R_6 = \text{int}(120/N) \text{ Ом}$ ;  
 $L_2 = L_4 = L_6 = 100 - 2,5N \text{ мГн}$ ;  $C_3 = C_5 = C_6 = 100 + 10N \text{ мкФ}$ ;
- параметры идеального источника синусоидального напряжения  $e_1$ : ЭДС  $E = 10 \text{ В}$  (действующее значение),  $f = 50 \text{ Гц}$ ;  $\Psi_u = 0$ ;
- режим работы **АС** амперметра **A1** и вольтметра **V1**; сопротивление амперметра  $1 \text{ нОм}$ ; сопротивление вольтметра  $10 \text{ МОм}$ ;
- чувствительность  $2 \text{ мВ/дел (mV/div)}$  канала **A** осциллографа, в котором регистрируется напряжение, снимаемое с резистора  $R_0$ ; чувствительность  $5 \text{ В/дел (5 V/div)}$  канала **B**, в котором регистрируется напряжение ветви; длительность развертки (**TIME BASE**) в режиме **Y/T** –  $2 \text{ мс/дел (2 ms/div)}$ ;
- управляющие клавиши **A, B, C, D, E** и **F** клавиши A, B, C, D, E и F клавиатуры.

**Скопировать** схему электрической цепи синусоидального тока (рис. 3) на страницу отчёта.

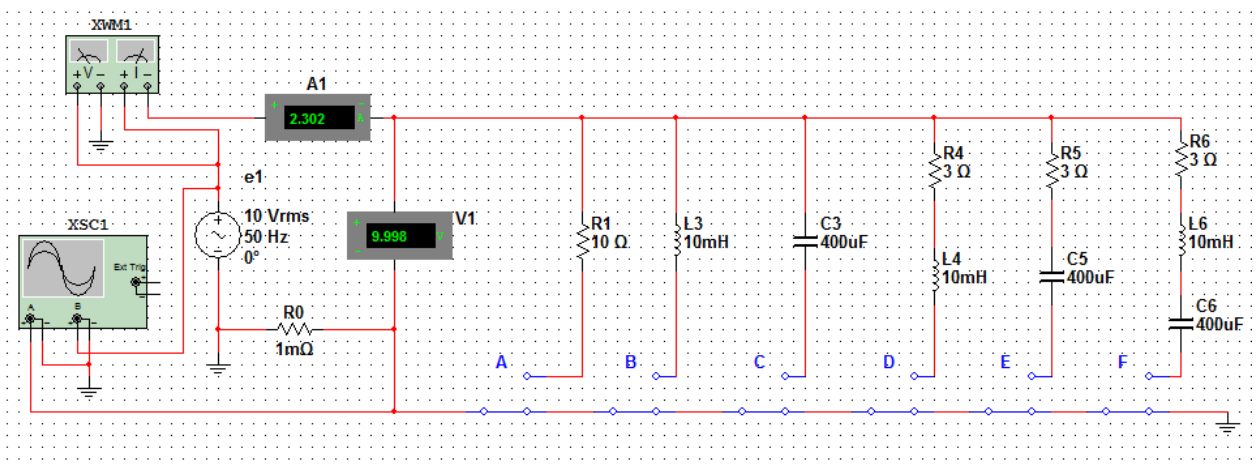



Рис. 3

**Задание 3.** Провести измерение токов, напряжений и углов сдвига фаз между ними в ветвях, содержащих соответственно резистивный **R1**, индуктивный **L2** и емкостный **C3** элементы.

С этой целью:

- **подключить** резистор **R1** (нажать клавишу **A** клавиатуры) к источнику синусоидального напряжения  $e_1$ , **запустить** программу моделирования схемы (щёлкнуть мышью на цифре 1 кнопки ) и **убедиться** (анализируя осциллограммы на экране осциллографа), что угол сдвига фаз между напряжением и током  $\varphi = 0$ . Ток  $I_1 = U/R_1$ ;
- **отключить** резистор **R1** (нажать клавишу **A** клавиатуры) и **подключить** катушку **L2** (нажать клавишу **B**) к источнику  $e_1$ . Показания вольтметра **V1** и амперметра **A1** при  $f = 50 \text{ Гц}$  занести в табл. 2. Изменяя ступенчато частоту напряжения (30, 40, 50, 60, 80, 100, 120 Гц), заносить показания вольтметра и амперметра в табл. 2. **Рассчитать** сопротивление

$X_{L2}(f) = U_L/I_L$  и **сравнить** полученные значения со значениями, найденными при выполнении задания 1. **Убедиться** (анализируя осциллограммы), что ток  $i_L$  отстает по фазе от напряжения  $u_L$  на угол  $\varphi = 90^\circ$ . **Скопировать** (или зарисовать) в отчёт осциллограммы  $u_L(t)$  и  $i_L(t)$  при  $f = 50$  Гц;

– **повторить** предыдущее задание относительно конденсатора **С3**, предварительно отключив от источника (посредством клавиши **В**) ветвь с элементом **L2** и подключив с помощью клавиши **С** к источнику **е1** ветвь с конденсатором **С3**. Показания приборов **вносить** в табл. 2. **Рассчитать** сопротивление конденсатора  $X_{C3}(f) = U_C/I_C$  (см. табл. 2) и **сравнить** полученные значения со значениями, найденными при выполнении задания 1. **Убедиться** (анализируя осциллограммы), что ток  $i_C$  опережает по фазе напряжение  $u_C$  на угол  $\varphi = 90^\circ$ .

**Скопировать** (или зарисовать) на страницу отчёта осциллограммы  $u_C(t)$  и  $i_C(t)$  при  $f = 50$  Гц.

**Задание 4. Провести** измерения токов, напряжений и углов сдвига фаз между ними в ветвях, содержащих соответственно **RL**-, **RC**- и **RLC**-элементы. С этой целью:

– **установить** частоту  $f = 50$  Гц источника напряжения **е1** и **подключить** к нему ветвь **R4L4**, предварительно отключив ветвь с конденсатором **С3**. Показания приборов **занести** в табл. 3. Угол  $\varphi$  **определить** косвенным методом, воспользовавшись осциллограммами напряжения и тока ветви, или из показания ваттметра **XWM1**. Для удобства измерений **изменяйте** чувствительность каналов и длительность развёртки осциллографа.

**Рассчитать** полное  $Z_4$ , активное  $R_4$  и реактивное  $X_{L4}$  сопротивления ветви **R4L4** и занести их значения в табл. 6.3. **Убедиться**, что ток  $i$  в **RL**-ветви отстает по фазе от напряжения  $u$  на угол  $\varphi_4 = \arctg(X_{L4}/R_4)$ ; **скопировать** (или зарисовать) на страницу отчёта осциллограммы напряжения и тока **RL**-ветви;

Таблица 3

Ветвь	Измерено			Рассчитано		
	$U$ , В	$I$ , А	$\varphi$ , град	$Z = U/I$ , Ом	$R = Z \cos \varphi$ , Ом	$X = Z \sin \varphi$ , Ом
$R_4L_4$						
$R_5C_5$						
$R_6L_6C_6$						

– **повторить** предыдущее задание для ветви **R5C5**, предварительно отключив от источника **е1** четвёртую ветвь. Убедиться, что ток  $i$  в **RC**-ветви опережает по фазе напряжения  $u$  на угол  $\varphi_5 = \arctg(-X_C/R_5)$ ;

– **скопировать** (или зарисовать) осциллограммы напряжения и тока **RC**-ветви;

– **повторить** предыдущее задание для ветви с элементами **R6**, **L6** и **C6**, предварительно отключив от источника  $e_1$  пятую ветвь. **Убедится**, что в  $RLC$ -ветви угол сдвига фаз  $\varphi_6$  между напряжением и током зависит от величины реактивного сопротивления

$$X_6 = X_{L6} - X_{C6}.$$

Если при частоте  $f = 50$  Гц, угол  $\varphi_6 = \arctg(X_{L6} - X_{C6})/R_6 > 0$ , то, уменьшив частоту до 20-30 Гц, угол  $\varphi_6$  изменит свой знак, и наоборот, если при  $f = 50$  Гц, угол  $\varphi_6 < 0$ , то, увеличив частоту  $f$  до 100...120 Гц, ток будет отставать по фазе от напряжения, при этом угол  $\varphi_6 > 0$ .

В качестве примера на рис. 4 представлены осциллограммы напряжения и тока  $R_6L_6C_6$ -ветви и показание ваттметра **XWM1**. Анализ осциллограмм показывает, что ток  $i_6$  опережает по фазе напряжение  $u_6$  на угол

$$\varphi_6 = -360^\circ \Delta t / T \approx -360 \cdot 2,847 / 4,5 \approx -51,3^\circ.$$

Воспользовавшись показанием ваттметра **XWM1**, находим модуль угла:

$$|\varphi_6| = \arccos(0,624) = 51,4^\circ.$$

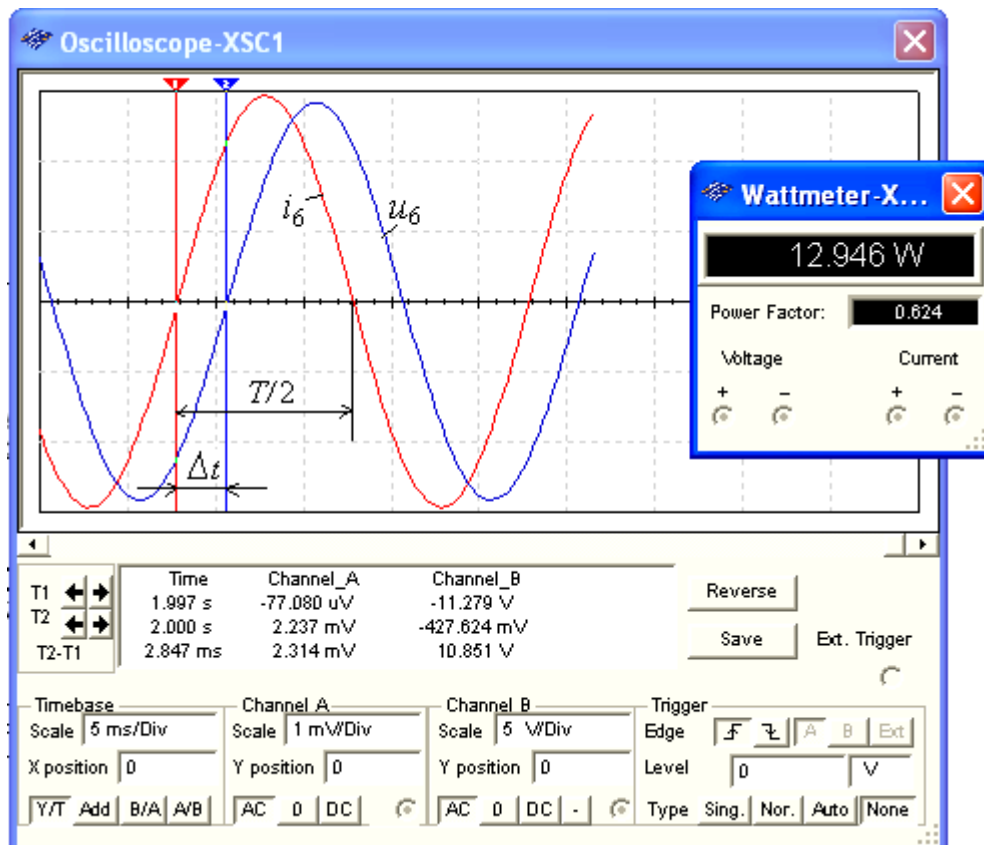


Рис. 4

**Задание 5.** Расчет разветвлённой цепи переменного тока символическим методом.

1. Определите токи в схеме согласно своему варианту (номер варианта соответствует номеру в журнале) символическим методом. Рассчитайте сдвиги фаз в ветвях схемы. Определите активные мощности в ветвях ( $P_i = I_i^2 R_i$ ).

2. Определите токи с использованием MS11. Определите сдвиги фаз и активные мощности в ветвях схемы с помощью ваттметра.
3. Результаты расчетов и измерений занесите в таблицу 4.
4. Постройте векторные диаграммы токов и топографические диаграммы напряжений в схеме.

Таблица 4

	Токи ветвей схемы					
	$i_1, \text{A}$	$i_2, \text{A}$	$i_3, \text{A}$	$\varphi_1, ^\circ$	$\varphi_2, ^\circ$	$\varphi_3, ^\circ$
Рассчитано						
Измерено						

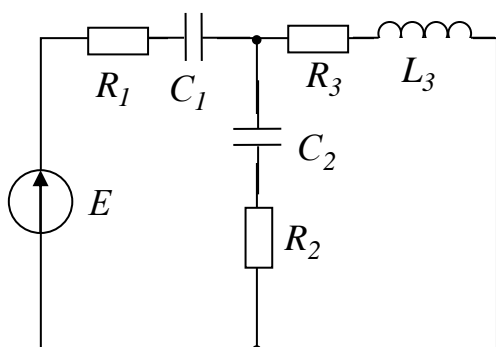


Рисунок 4.1

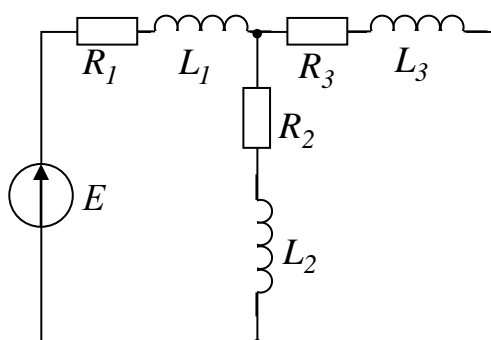


Рисунок 4.2

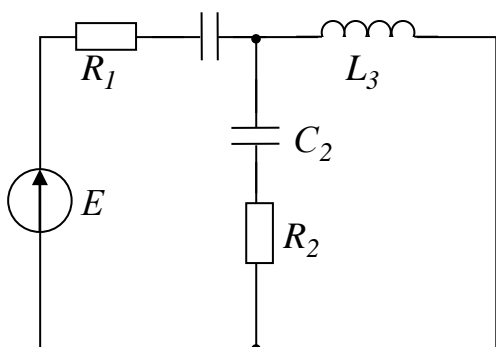


Рисунок 4.3

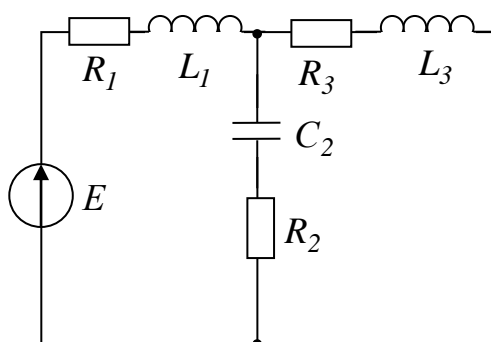


Рисунок 4.4

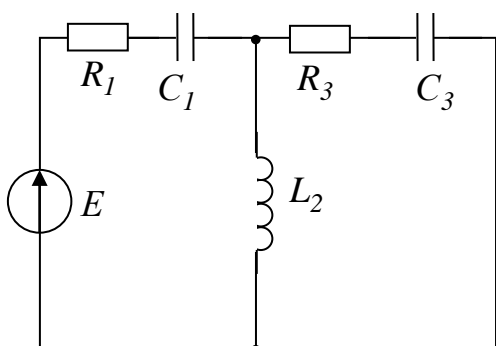


Рисунок 4.5

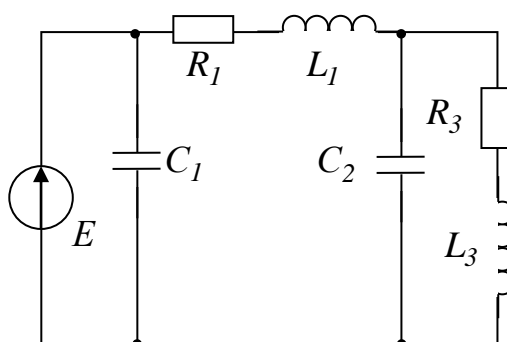


Рисунок 4.6

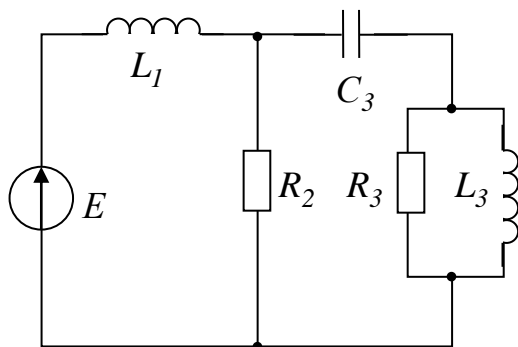


Рисунок 4.7

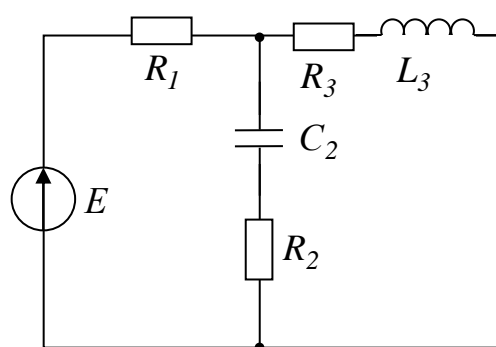


Рисунок 4.8

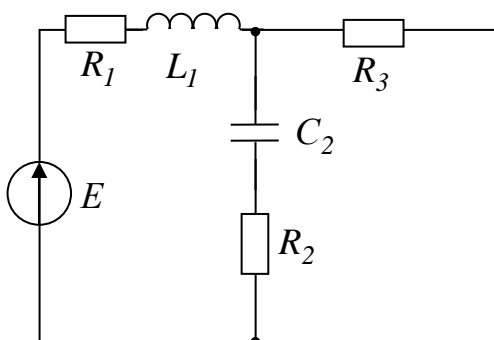


Рисунок 4.9

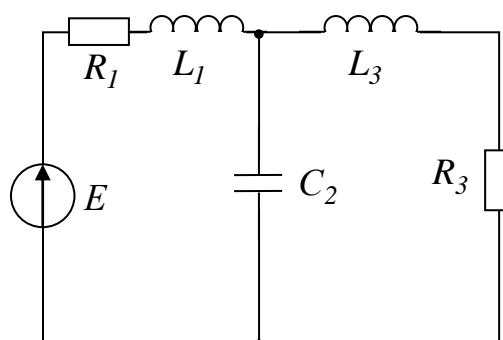


Рисунок 4.10

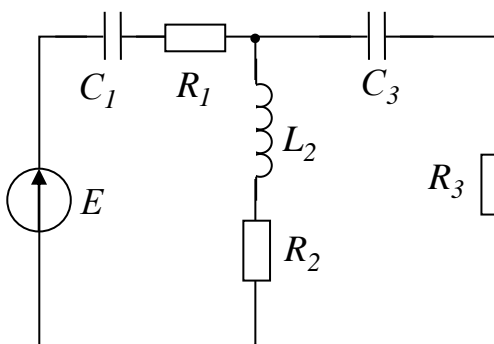


Рисунок 4.11

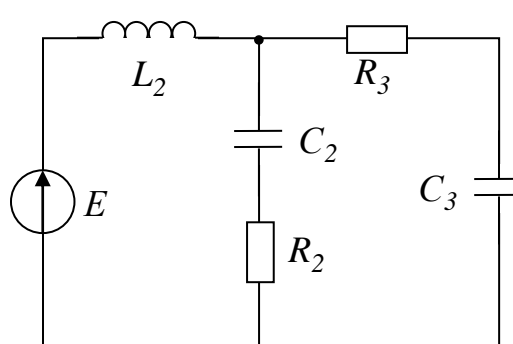


Рисунок 4.12

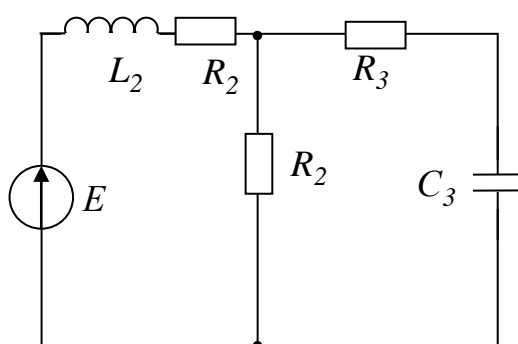


Рисунок 4.13

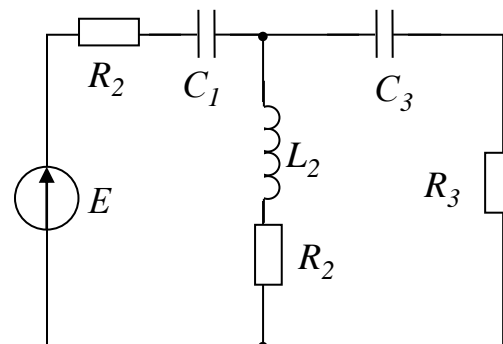


Рисунок 4.14



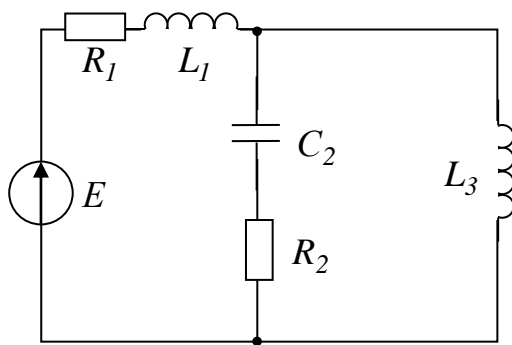


Рисунок 4.15

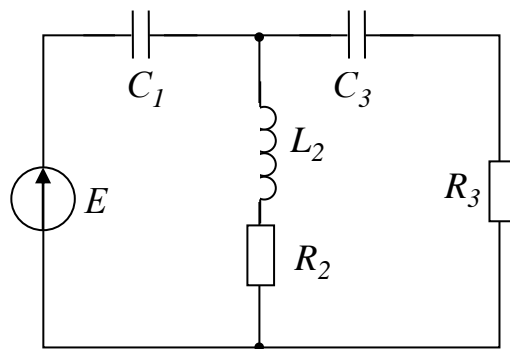


Рисунок 4.16

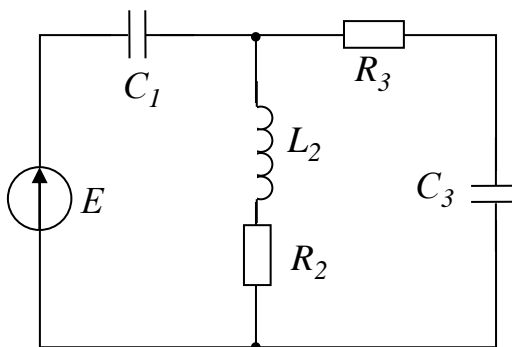


Рисунок 4.17

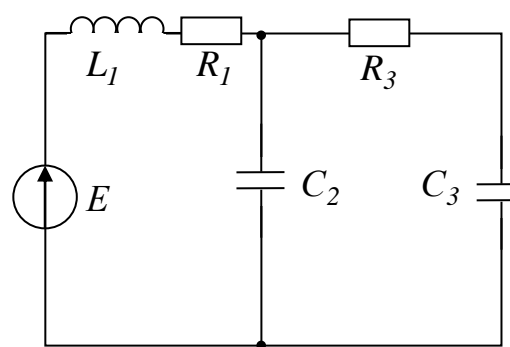


Рисунок 4.18

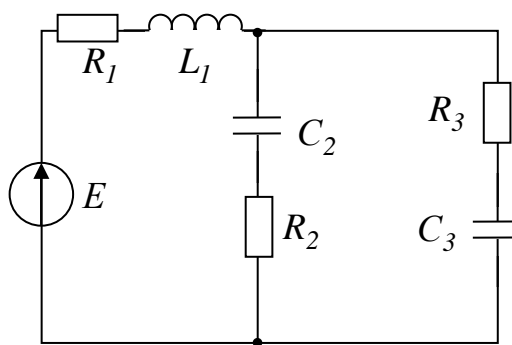


Рисунок 4.19

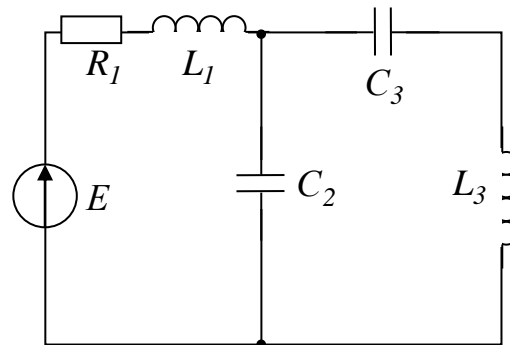


Рисунок 4.20

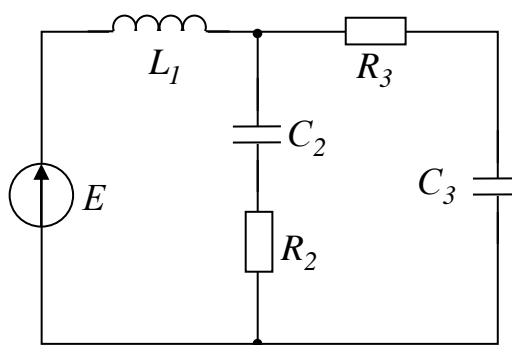


Рисунок 4.21

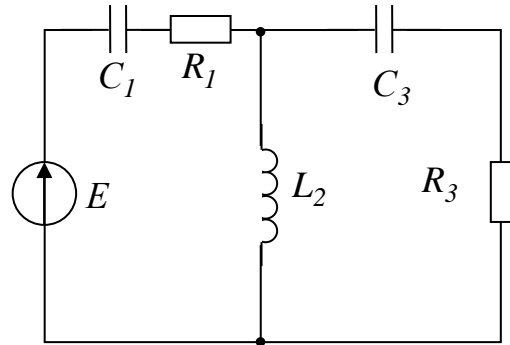


Рисунок 4.22

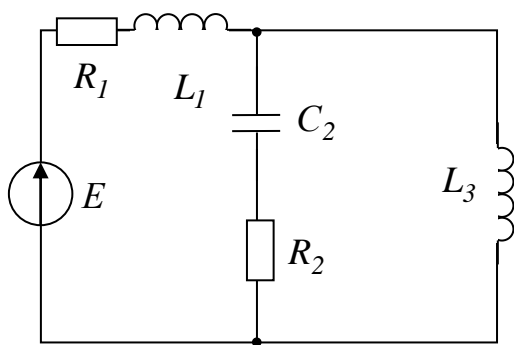


Рисунок 4.23

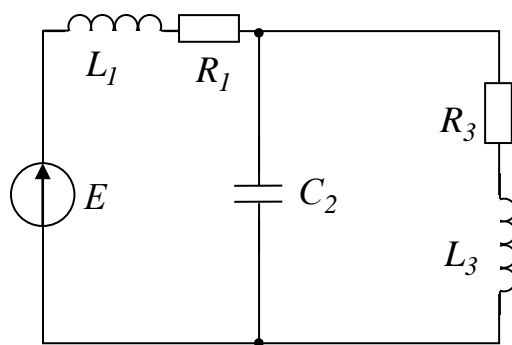


Рисунок 4.24

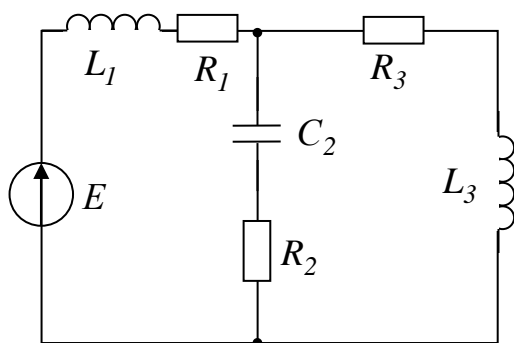


Рисунок 4.25

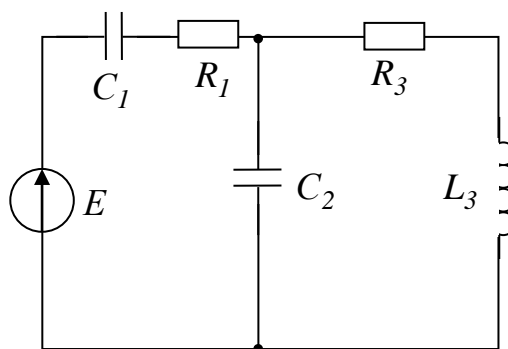


Рисунок 4.26

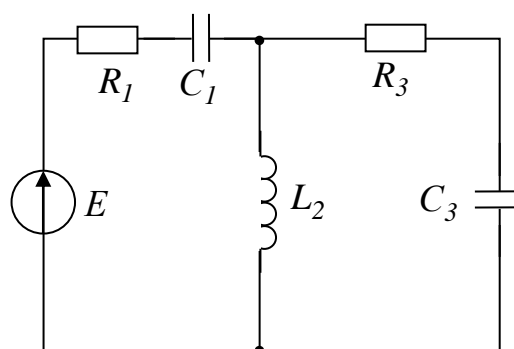


Рисунок 4.27

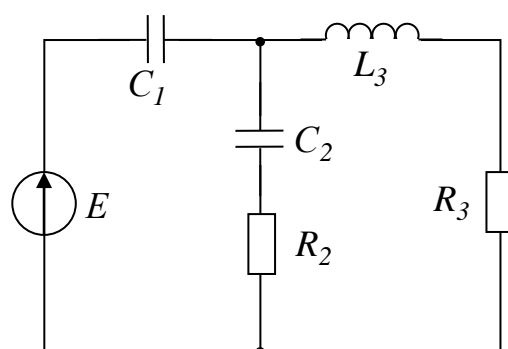


Рисунок 4.28

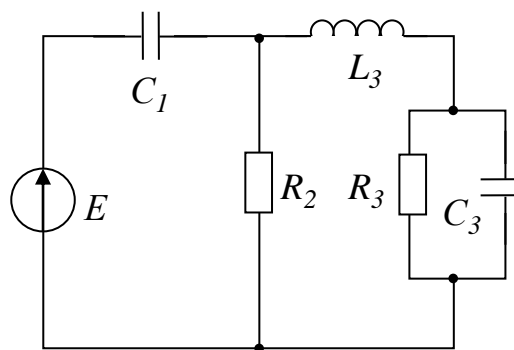


Рисунок 4.29

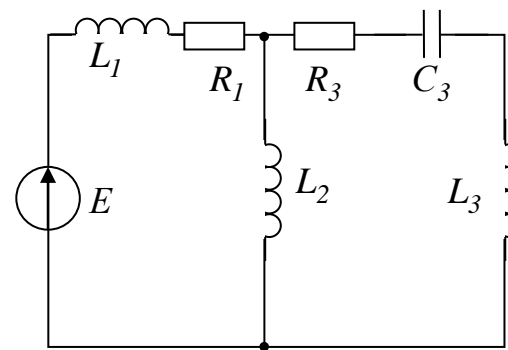


Рисунок 4.30

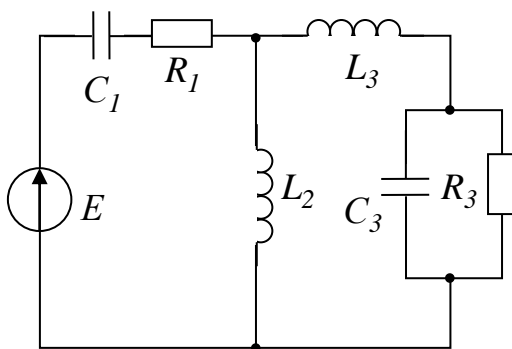


Рисунок 4.31

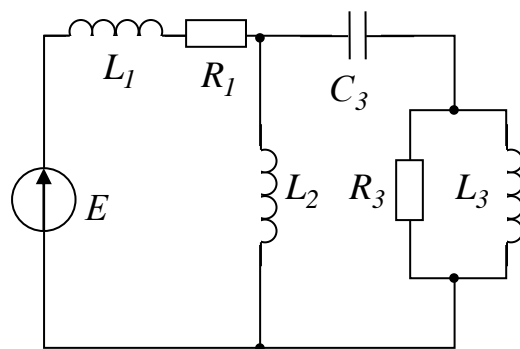


Рисунок 4.32

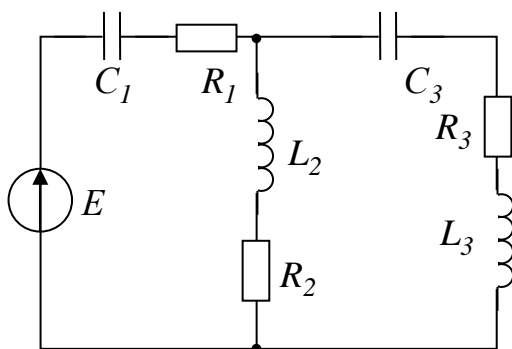


Рисунок 4.33

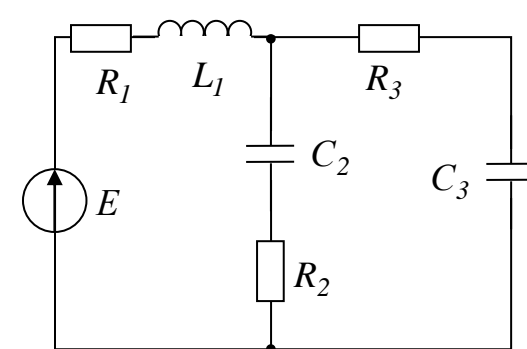


Рисунок 4.34

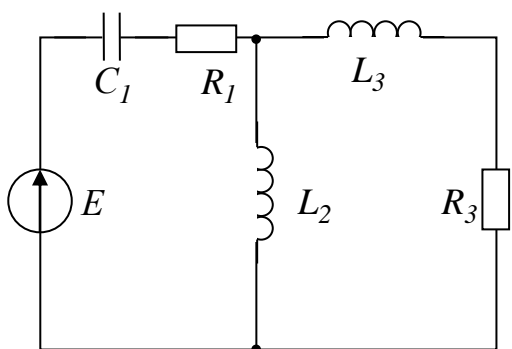


Рисунок 4.35

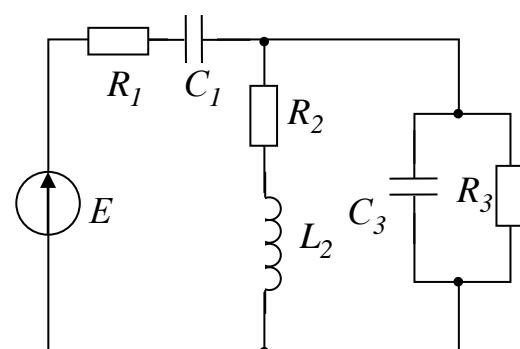


Рисунок 4.36

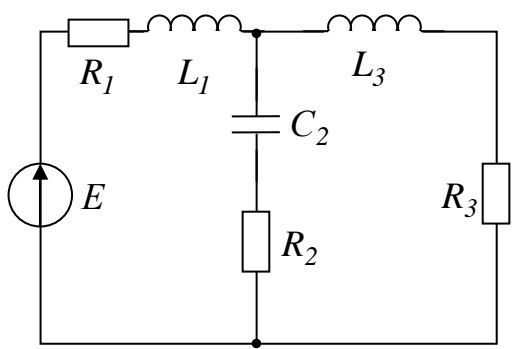


Рисунок 4.37

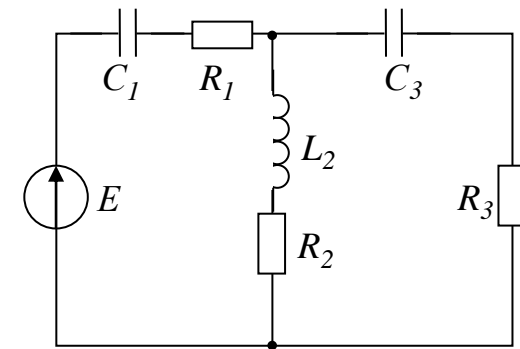


Рисунок 4.38

Таблица – Значения ЭДС и сопротивлений резисторов для цепей, схемы которых приведены на рисунках 4.1- 4.38

№ вар.	№ рис.	$E$ , $B$	$f$ , $Гц$	$C_1$ , $мкФ$	$C_2$ , $мкФ$	$C_3$ , $мкФ$	$L_1$ , $мГн$	$L_2$ , $мГн$	$L_3$ , $мГн$	$R_1$ , $Ом$	$R_2$ , $Ом$	$R_3$ , $Ом$
1	4.1	100	50	637	300	-	-	-	15,9	10	4	6
2	4.2	100	50	-	-	-	15,9	9	15,9	8	3	4
3	4.3	200	50	637	300	-	-	-	15,9	8	3	-
4	4.4	120	50	-	300	-	15,9	-	15,9	8	3	4
5	4.5	220	50	6,37	-	100	-	47,7	-	8	-	4
6	4.6	50	50	100	159	-	15,9	-	47,7	10	-	10
7	4.7	100	50	-	-	300	15,9	-	115	-	10	10
8	4.8	120	50	-	100	-	-	-	115	10	4	10
9	4.9	200	50	-	159	-	31,8	-	-	10	4	10
10	4.10	220	50	-	318	-	15,9	-	47,7	10	-	10
11	4.11	50	50	637	-	300	-	15,9	-	6	5	8
12	4.12	100	50	-	637	100	15,7	-	-	-	10	8
13	4.13	200	50	-	-	100	31,8	-	-	5	10	8
14	4.14	220	50	637	-	200	-	15,9	-	5	10	8
15	4.15	150	50	-	100	-	15,9	-	47,5	10	2	-
16	4.16	100	50	637	-	200	-	31,8	-	-	8	10
17	4.17	120	50	100	-	200	-	15,9	-	-	8	10
18	4.18	200	50	-	637	200	15,7	-	-	8	-	10
19	4.19	220	50	-	160	-	31,8	-	95	10	8	4
20	4.20	50	50	-	159	200	31,8	-	95	15	-	-
21	4.21	100	50	-	159	200	15,9	-	-	-	15	10
22	4.22	120	50	637	-	200	-	15,9	-	10	-	20
23	4.23	200	50	-	159	-	115	-	47,7	15	10	-
24	4.24	220	50	-	159	-	32,8	-	95	4	-	20
25	4.25	150	50	-	159	-	25	-	95	6	10	8
26	4.26	100	50	100	159	-	-	-	95	6	-	20
27	4.27	100	50	100	-	159	-	25	-	6	-	4
28	4.28	200	50	100	159	-	-	-	95	-	6	2
29	4.29	220	50	637	-	637	-	-	25	-	10	2
30	4.30	500	50	-	-	637	25	15,7	31,8	10	-	4
31	4.31	100	50	318	-	300	-	31,8	31,8	12	-	10
32	4.32	120	50	-	-	300	25	15,9	8	4	-	10
33	4.33	200	50	318	-	300	-	31,8	95	10	12	4
34	4.34	220	50	-	159	300	25	-	-	4	15	10
35	4.35	50	50	100	-	-	-	15,9	31,8	8	-	4
36	4.36	100	50	637	-	200	-	19,5	-	8	10	4
37	4.37	150	50	-	637	-	31,8	-	95	8	12	4
38	4.38	200	50	637	-	200	-	15,9	-	8	12	4

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Электрические расчётные схемы и копия схемы цепи, собранной на рабочем поле программной среды MS11.
3. Расчётные формулы, векторные и временные диаграммы напряжений и токов ветвей цепи.
4. Таблицы с расчётными и экспериментальными данными.
5. Графики  $X_L(f)$  и  $X_C(f)$ .
6. Расчет цепи переменного тока символическим методом.
7. Схема для исследования цепи переменного тока.
6. Выводы по работе.