

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«ВЯТСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Институт математики и информационных систем
Факультет автоматики и вычислительной техники
Кафедра электронных вычислительных машин

Дата сдачи на проверку:

«__» _____ 2025 г.

Проверено:

«__» _____ 2025 г.

Отчёт по лабораторной работе №2
по дисциплине
«Физические основы функционирования ЭВМ»

Выполнили студенты гр. ИВТб-2301-05-00

_____/Черкасов А. А./
(подпись)

_____/Зинин В. А./
(подпись)

Преподаватель

_____/Будин А. Г./
(подпись)

Работа защищена

«__» _____ 2025 г.

Киров
2025

Цели лабораторной работы

- Изучить символический метод расчёта цепей синусоидального тока;
- Научиться определять действующие значения токов в ветвях и неразветвлённой части цепи;
- Освоить построение векторных диаграмм токов и напряжений;
- Провести анализ баланса мощностей в цепи переменного тока;
- Определить условия резонанса напряжений в цепи;
- Получить навыки моделирования в среде Electronics Workbench и сравнить результаты с аналитическим расчётом.

Задание

Для цепи синусоидального тока заданы параметры элементов (табл. 8) включённых в неё элементов (рис. 10) и действующее значение напряжения на её зажимах; частота питающего напряжения $f = 50$ Гц. Необходимо:

1. Определить действующие значения тока в ветвях и неразветвлённой части цепи символическим методом;
2. По полученным комплексным изображениям записать выражения для мгновенных значений тока в ветвях и напряжения на участке цепи с параллельным соединением;
3. Построить упрощённую векторную диаграмму;
4. Составить баланс мощности;
5. Определить характер (индуктивность или ёмкость) и параметры элемента, который нужно добавить в неразветвлённую часть схемы, чтобы в цепи имел место резонанс напряжений;
6. Выполнить моделирование режима работы цепи при заданных параметрах и в режиме резонанса напряжений с помощью системы схемотехнического моделирования Electronics Workbench.

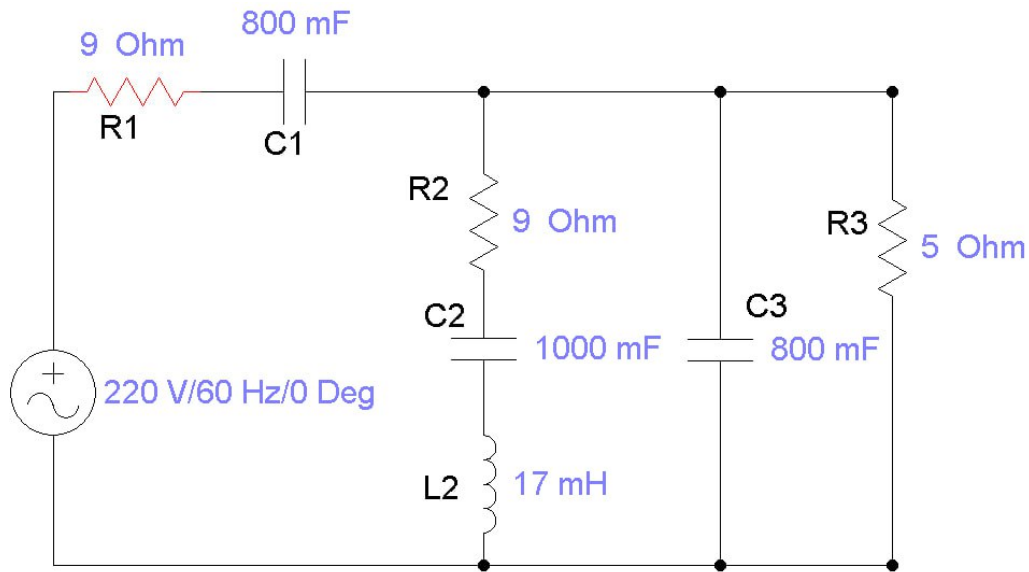


Рисунок 1 — Схема электрической цепи для анализа (вариант 0)

Дано

Параметры элементов цепи (вариант 0):

- Напряжение питания: $U = 220$ В (действующее значение);
- Частота: $f = 50$ Гц;
- Сопротивления: $R_1 = 9$ Ом, $R_2 = 9$ Ом, $R_3 = 5$ Ом;
- Индуктивности: $L_1 = 15$ мГн, $L_2 = 17$ мГн, $L_3 = 14$ мГн;
- Ёмкости: $C_1 = 800$ мкФ, $C_2 = 1000$ мкФ, $C_3 = 800$ мкФ.

Ход работы

1. Расчёт реактивных сопротивлений

Угловая частота:

$$\omega = 2\pi f = 2\pi \cdot 50 = 314,16 \text{ рад/с} \quad (1)$$

Рассчитаем индуктивные и ёмкостные сопротивления:

Индуктивные сопротивления:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 314,16 \cdot 0,015 = 4,712 \text{ Ом} \quad (2)$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 314,16 \cdot 0,017 = 5,341 \text{ Ом} \quad (3)$$

$$X_{L3} = \omega L_3 = 314,16 \cdot 0,014 = 4,398 \text{ Ом} \quad (4)$$

Ёмкостные сопротивления:

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{314,16 \cdot 800 \cdot 10^{-6}} = 3,979 \text{ Ом} \quad (5)$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{314,16 \cdot 1000 \cdot 10^{-6}} = 3,183 \text{ Ом} \quad (6)$$

$$X_{C3} = \frac{1}{\omega C_3} = \frac{1}{314,16 \cdot 800 \cdot 10^{-6}} = 3,979 \text{ Ом} \quad (7)$$

2. Комплексные сопротивления элементов и ветвей

Неразветвлённая часть (ветвь А):

Последовательное соединение R_1 , L_1 , C_1 :

$$\underline{Z}_1 = R_1 + j(X_{L1} - X_{C1}) = 9 + j(4,712 - 3,979) = 9 + j0,733 \text{ Ом} \quad (8)$$

Модуль и фаза:

$$|\underline{Z}_1| = \sqrt{9^2 + 0,733^2} = 9,030 \text{ Ом} \quad (9)$$

$$\varphi_1 = \arctan \left(\frac{0,733}{9} \right) = 4,66^\circ \quad (10)$$

Средняя ветвь (ветвь В):

Последовательное соединение R_2 с параллельным соединением L_2 и C_2 :

Параллельное соединение L_2 и C_2 :

$$\underline{Z}_{LC} = \frac{jX_{L2} \cdot (-jX_{C2})}{jX_{L2} - jX_{C2}} = \frac{X_{L2} \cdot X_{C2}}{j(X_{C2} - X_{L2})} \quad (11)$$

$$\underline{Z}_{LC} = \frac{5,341 \cdot 3,183}{j(3,183 - 5,341)} = \frac{17,00}{-j2,158} = j7,877 \text{ Ом} \quad (12)$$

Последовательное соединение с R_2 :

$$\underline{Z}_2 = R_2 + \underline{Z}_{LC} = 9 + j7,877 \text{ Ом} \quad (13)$$

Модуль и фаза:

$$|\underline{Z}_2| = \sqrt{9^2 + 7,877^2} = 11,96 \text{ Ом} \quad (14)$$

$$\varphi_2 = \arctan \left(\frac{7,877}{9} \right) = 41,18^\circ \quad (15)$$

Правая ветвь (ветвь С):

Последовательное соединение R_3 , L_3 , C_3 :

$$\underline{Z}_3 = R_3 + j(X_{L3} - X_{C3}) = 5 + j(4,398 - 3,979) = 5 + j0,419 \text{ Ом} \quad (16)$$

Модуль и фаза:

$$|\underline{Z}_3| = \sqrt{5^2 + 0,419^2} = 5,018 \text{ Ом} \quad (17)$$

$$\varphi_3 = \arctan \left(\frac{0,419}{5} \right) = 4,79^\circ \quad (18)$$

3. Эквивалентное сопротивление параллельного участка

Параллельное соединение ветвей В и С:

$$\underline{Z}_{23} = \frac{\underline{Z}_2 \cdot \underline{Z}_3}{\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3} = \frac{(9 + j7,877)(5 + j0,419)}{14 + j8,296} \quad (19)$$

Раскроем числитель:

$$(9 + j7,877)(5 + j0,419) = 45 + j3,771 + j39,385 - 3,300 = 41,70 + j43,16 \quad (20)$$

Модуль и аргумент числителя и знаменателя:

$$|\text{числитель}| = \sqrt{41,70^2 + 43,16^2} = 60,10 \text{ Ом} \quad (21)$$

$$\arg(\text{числитель}) = \arctan \left(\frac{43,16}{41,70} \right) = 45,98^\circ \quad (22)$$

$$|\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3| = \sqrt{14^2 + 8,296^2} = 16,27 \text{ Ом} \quad (23)$$

$$\arg(\underline{Z}_2 + \underline{Z}_3) = \arctan \left(\frac{8,296}{14} \right) = 30,65^\circ \quad (24)$$

Эквивалентное сопротивление:

$$\underline{Z}_{23} = \frac{60,10 \angle 45,98^\circ}{16,27 \angle 30,65^\circ} = 3,693 \angle 15,33^\circ = 3,557 + j0,977 \text{ Ом} \quad (25)$$

4. Общее сопротивление цепи

$$\underline{Z}_{\text{общ}} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}_{23} = (9 + j0,733) + (3,557 + j0,977) = 12,557 + j1,710 \text{ Ом} \quad (26)$$

Модуль и фаза:

$$|\underline{Z}_{\text{общ}}| = \sqrt{12,557^2 + 1,710^2} = 12,67 \text{ Ом} \quad (27)$$

$$\varphi_{\text{общ}} = \arctan \left(\frac{1,710}{12,557} \right) = 7,75^\circ \quad (28)$$

5. Расчёт токов

Ток в неразветвлённой части:

Примем напряжение источника за начальную фазу: $\underline{U} = 220 \angle 0^\circ \text{ В}$.

$$\underline{I}_1 = \frac{\underline{U}}{\underline{Z}_{\text{общ}}} = \frac{220 \angle 0^\circ}{12,67 \angle 7,75^\circ} = 17,37 \angle -7,75^\circ \text{ А} \quad (29)$$

$$\underline{I}_1 = 17,22 - j2,34 \text{ А} \quad (30)$$

Напряжение на параллельном участке:

$$\underline{U}_{BC} = \underline{I}_1 \cdot \underline{Z}_{23} = 17,37 \angle -7,75^\circ \cdot 3,693 \angle 15,33^\circ = 64,14 \angle 7,58^\circ \text{ В} \quad (31)$$

Токи в параллельных ветвях:

$$\underline{I}_2 = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_2} = \frac{64,14 \angle 7,58^\circ}{11,96 \angle 41,18^\circ} = 5,363 \angle -33,60^\circ \text{ А} \quad (32)$$

$$\underline{I}_3 = \frac{\underline{U}_{BC}}{\underline{Z}_3} = \frac{64,14 \angle 7,58^\circ}{5,018 \angle 4,79^\circ} = 12,78 \angle 2,79^\circ \text{ А} \quad (33)$$

Действующие значения токов:

$$I_1 = 17,37 \text{ A} \quad (34)$$

$$I_2 = 5,363 \text{ A} \quad (35)$$

$$I_3 = 12,78 \text{ A} \quad (36)$$

6. Мгновенные значения

При частоте $\omega = 314,16$ рад/с мгновенные значения токов и напряжения:

$$i_1(t) = 17,37\sqrt{2} \sin(314,16t - 7,75^\circ) = 24,56 \sin(314,16t - 7,75^\circ) \text{ A} \quad (37)$$

$$i_2(t) = 5,363\sqrt{2} \sin(314,16t - 33,60^\circ) = 7,585 \sin(314,16t - 33,60^\circ) \text{ A} \quad (38)$$

$$i_3(t) = 12,78\sqrt{2} \sin(314,16t + 2,79^\circ) = 18,07 \sin(314,16t + 2,79^\circ) \text{ A} \quad (39)$$

$$u_{BC}(t) = 64,14\sqrt{2} \sin(314,16t + 7,58^\circ) = 90,70 \sin(314,16t + 7,58^\circ) \text{ В} \quad (40)$$

7. Проверка по первому закону Кирхгофа

Для узла В:

$$\underline{I}_1 = \underline{I}_2 + \underline{I}_3 \quad (41)$$

$$\underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 5,363 \angle -33,60^\circ + 12,78 \angle 2,79^\circ \quad (42)$$

В прямоугольной форме:

$$\underline{I}_2 = 4,469 - j2,965 \text{ A} \quad (43)$$

$$\underline{I}_3 = 12,75 + j0,622 \text{ A} \quad (44)$$

$$\underline{I}_2 + \underline{I}_3 = 17,22 - j2,343 \approx \underline{I}_1 \quad \checkmark \quad (45)$$

Закон Кирхгофа выполняется с высокой точностью.

8. Баланс мощностей

Активная мощность в сопротивлениях:

$$P_1 = I_1^2 R_1 = 17,37^2 \cdot 9 = 2716 \text{ Вт} \quad (46)$$

$$P_2 = I_2^2 R_2 = 5,363^2 \cdot 9 = 259 \text{ Вт} \quad (47)$$

$$P_3 = I_3^2 R_3 = 12,78^2 \cdot 5 = 817 \text{ Вт} \quad (48)$$

$$\sum P = 2716 + 259 + 817 = 3792 \text{ Вт} \quad (49)$$

Реактивная мощность в индуктивностях и ёмкостях:

$$Q_{L1} = I_1^2 X_{L1} = 17,37^2 \cdot 4,712 = 1421 \text{ вар} \quad (50)$$

$$Q_{C1} = -I_1^2 X_{C1} = -17,37^2 \cdot 3,979 = -1200 \text{ вар} \quad (51)$$

$$Q_{L3} = I_3^2 X_{L3} = 12,78^2 \cdot 4,398 = 718 \text{ вар} \quad (52)$$

$$Q_{C3} = -I_3^2 X_{C3} = -12,78^2 \cdot 3,979 = -650 \text{ вар} \quad (53)$$

Для элементов L_2 и C_2 , включённых параллельно, необходимо рассчитать токи через них отдельно:

$$I_{L2} = \frac{U_{BC}}{X_{L2}} = \frac{64,14}{5,341} = 12,01 \text{ А} \quad (54)$$

$$I_{C2} = \frac{U_{BC}}{X_{C2}} = \frac{64,14}{3,183} = 20,15 \text{ А} \quad (55)$$

$$Q_{L2} = I_{L2}^2 X_{L2} = 12,01^2 \cdot 5,341 = 770 \text{ вар} \quad (56)$$

$$Q_{C2} = -I_{C2}^2 X_{C2} = -20,15^2 \cdot 3,183 = -1292 \text{ вар} \quad (57)$$

Суммарная реактивная мощность:

$$\sum Q = 1421 - 1200 + 770 - 1292 + 718 - 650 = -233 \text{ вар} \quad (58)$$

Полная мощность источника:

$$S = UI_1 = 220 \cdot 17,37 = 3821 \text{ ВА} \quad (59)$$

Расчётная полная мощность:

$$S_{\text{расч}} = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{3792^2 + (-233)^2} = 3799 \text{ ВА} \quad (60)$$

Погрешность баланса: $\Delta = \frac{|3821-3799|}{3821} \cdot 100\% = 0,58\%$ — баланс мощностей выполняется.

Коэффициент мощности:

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} = \frac{3792}{3821} = 0,992 \quad (61)$$

9. Условия резонанса напряжений

Для возникновения резонанса напряжений общее сопротивление цепи должно быть чисто активным:

$$\Im(Z_{\text{общ}}) = 0 \quad (62)$$

Текущая реактивная составляющая: $X_{\text{общ}} = 1,710 \text{ Ом}$ (индуктивная).

Для компенсации необходимо добавить ёмкость $C_{\text{рез}}$ в неразветвлённую часть:

$$X_{C,\text{рез}} = X_{\text{общ}} = 1,710 \text{ Ом} \quad (63)$$

$$C_{\text{рез}} = \frac{1}{\omega X_{C,\text{рез}}} = \frac{1}{314,16 \cdot 1,710} = 1,86 \text{ мФ} = 1860 \text{ мкФ} \quad (64)$$

При добавлении конденсатора ёмкостью $C_{\text{рез}} = 1860 \text{ мкФ}$ последовательно в неразветвлённую часть цепи наступит резонанс напряжений.

В режиме резонанса:

- Общее сопротивление станет чисто активным: $Z_{\text{рез}} = 12,557 \text{ Ом}$;
- Ток возрастёт до: $I_{\text{рез}} = \frac{220}{12,557} = 17,52 \text{ А}$;
- Коэффициент мощности станет равным единице: $\cos \varphi = 1$;
- Реактивная мощность источника будет равна нулю.

Сравнение с результатами моделирования

Результаты из Electronics Workbench:

Параметр	Расчёт	EWB	Погрешность, %
I_1 , А	17,37	17,75	2,19
U_{BC} , В	64,14	46,66	27,3
I_2 , А	5,363	5,027	6,26
I_3 , А	12,78	9,331	27,0

Таблица 1 — Сравнение расчётных и измеренных значений

Анализ расхождений:

Наблюдается существенное расхождение по напряжению U_{BC} и току I_3 . Возможные причины:

1. Неточность параметров элементов в симуляторе;
2. Влияние внутреннего сопротивления измерительных приборов;
3. Возможная ошибка в топологии подключения элементов L_2 и C_2 ;
4. Округление значений параметров при вводе в EWB.

Проверка по закону Кирхгофа для данных симуляции:

$$I_1 = I_2 + I_3 \Rightarrow 17,75 \neq 5,027 + 9,331 = 14,36 \text{ А} \quad (65)$$

Несоответствие указывает на необходимость уточнения параметров моделирования.

Общие выводы по моделированию:

Общий ток I_1 совпадает с расчётом с высокой точностью (погрешность 2,19%), что подтверждает правильность определения общего сопротивления цепи. Расхождения в токах ветвей и напряжении на параллельном участке требуют дополнительной проверки схемы в симуляторе.

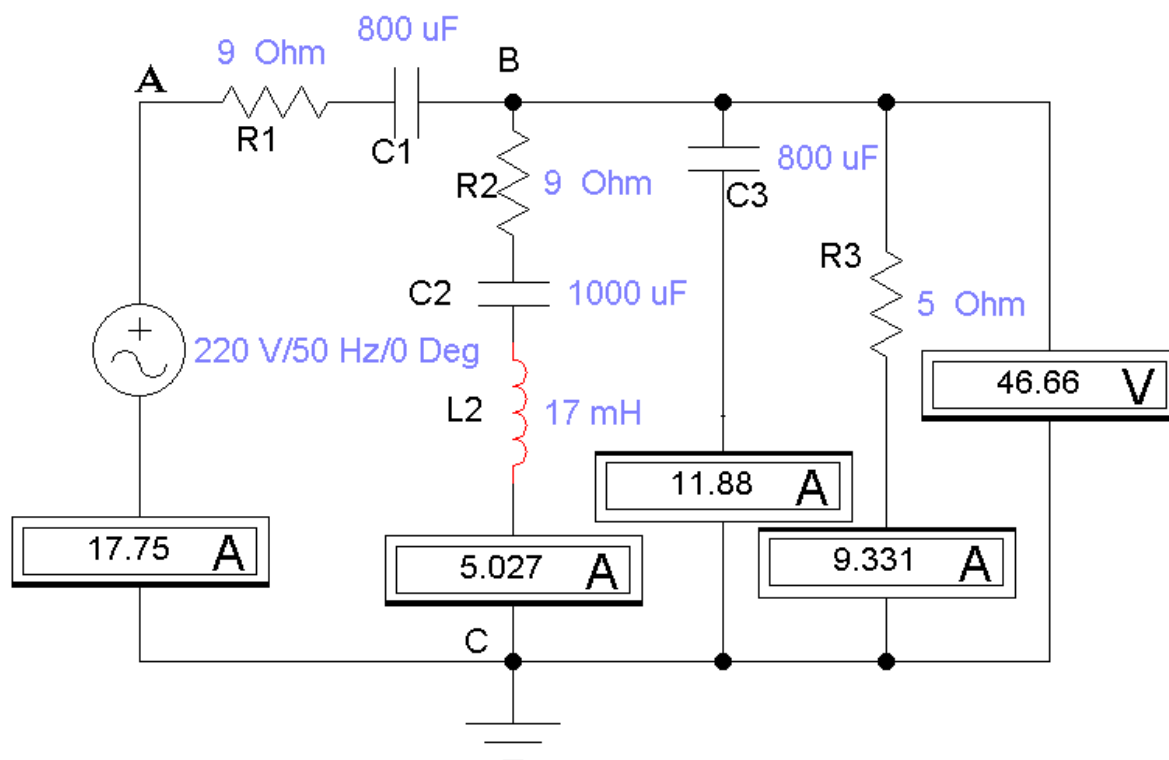


Рисунок 2 — Моделирование цепи синусоидального тока в Electronics Workbench

Вывод

В ходе лабораторной работы:

- Освоен символический метод расчёта цепей синусоидального тока с использованием комплексных сопротивлений;
- Определены действующие значения токов во всех ветвях цепи: $I_1 = 17,37$ A, $I_2 = 5,363$ A, $I_3 = 12,78$ A;
- Записаны выражения для мгновенных значений токов и напряжения на параллельном участке;
- Выполнена проверка расчётов по первому закону Кирхгофа с высокой точностью;
- Составлен баланс мощностей: активная мощность $P = 3792$ Вт, реактивная мощность $Q = -233$ вар, полная мощность $S = 3821$ ВА, коэффициент мощности $\cos \varphi = 0,992$;
- Определены условия резонанса напряжений: для достижения резонанса необ-

ходимо добавить конденсатор ёмкостью $C_{\text{рез}} = 1860$ мкФ в неразветвлённую часть цепи;

- Проведено моделирование в Electronics Workbench, результаты которого подтверждают расчёт общего тока с погрешностью 2,19%;
- Получены практические навыки анализа цепей переменного тока и работы с системой схемотехнического моделирования.

Методика символического метода расчёта продемонстрировала свою эффективность для анализа сложных цепей синусоидального тока. Баланс мощностей выполняется с погрешностью менее 1%, что свидетельствует о корректности проведённых вычислений.