

Ю.А. МЕЛЕШКИН  
И.А. АНДРЕЕВ  
С.В. СНАДЧЕНКО

**ЭЛЕКТРОТЕХНИКА  
И ЭЛЕКТРОНИКА  
(РАСЧЕТНО\_ГРАФИЧЕСКИЕ РАБОТЫ)**

Методические указания  
для самостоятельной работы





МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Филиал федерального государственного бюджетного  
образовательного учреждения высшего образования  
«Самарский Государственный технический университет»  
в г.Сызрани.

---

Кафедра «Электротехника, информатика и компьютерные технологии»

Ю.А. МЕЛЕШКИН  
И.А. АНДРЕЕВ  
С.В. СНАДЧЕНКО

# **ЭЛЕКТРОТЕХНИКА И ЭЛЕКТРОНИКА (РАСЧЕТНО\_ГРАФИЧЕСКИЕ РАБОТЫ)**

Методические указания  
для самостоятельной работы

Сызрань 2016

Составители:

*Ю.А. Мелешкин, И.А.Андреев, С.В.Снадченко*

УДК 621.375

ББК 32.85

### **Электротехника и электроника. Расчетно-графические работы:**

Метод. указ. для самостоятельной работы./СамГТУ, филиал в г.Сызрани.  
сост. *Ю.А. Мелешкин, И.А.Андреев, С.В.Снадченко*. Сызрань, 2016 . 80 с.

Приведены расчетно-графические работы с примерами решения по дисциплинам «Теоретические основы электротехники», «Электротехника и электроника»

Методические указания предназначены для студентов всех направлений подготовки бакалавров в СФ СамГТУ.

Ил.: 78. Табл.: 9. Библиогр.: 7 назв

Печатается по решению научно-методического совета электротехнического факультета филиала СамГТУ

Рецензент: доцент кафедры ЭПА филиала ФГБОУ ВПО «СамГТУ» в г. Сызрани к.т.н. Тамьяров А.В.

© Ю.А.Мелешкин, И.А.Андреев, С.В.Снадченко, 2016

© Самарский государственный технический университет, 2016

# 1. АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ПОСТОЯННОГО ТОКА

## Расчётно-графическая работа № 1

Для электрической цепи с заданным графом (рис. 1.1-1.4), схемой ветвей (рис. 1.5) и заданными параметрами элементов схемы (табл. 1.1) провести следующий анализ.

- 1 Составить матрицу соединений  $[A]$ .
- 2 Нарисовать одно из деревьев графа с указанием (штриховой линией) ветвей связи.
- 3 Выбрать главное сечение и составить матрицу сечений  $[D]$ .
- 4 Записать с помощью матриц  $[A]$  и  $[D]$  две системы уравнений по первому закону Кирхгофа (для узлов и сечений).
- 5 Выбрать главные контуры и составить матрицу контуров  $[B]$ .
- 6 Записать с помощью матрицы  $[B]$  систему уравнений по второму закону Кирхгофа.
- 7 Записать для каждой ветви компонентное уравнение ветви (используя обобщённый закон Ома).
- 8 Составить систему узловых уравнений, определить потенциалы, напряжения на ветвях и токи в ветвях.
- 9 Составить систему контурных уравнений, определить токи в ветвях.

Внимание! Уравнения по п.8 и 9 составить без эквивалентного преобразования электрической схемы.

- 10 Определить ток  $I_4$  в четвёртой ветви методом эквивалентного генератора.
- 11 Проверить соблюдение баланса мощности в электрической цепи. Определить расход энергии за  $t = 10$  секунд.
- 12 Для любого контура с двумя источниками ЭДС построить потенциальную диаграмму.

Таблица 1.1

№ вар.	№ рис.	ПАРАМЕТРЫ ЭЛЕМЕНТОВ ЦЕПИ																	
		E <sub>1</sub> В	E <sub>2</sub> В	E <sub>3</sub> В	E <sub>4</sub> В	E <sub>5</sub> В	E <sub>6</sub> В	J <sub>1</sub> А	J <sub>2</sub> А	J <sub>3</sub> А	J <sub>4</sub> А	J <sub>5</sub> А	J <sub>6</sub> А	R <sub>1</sub> Ом	R <sub>2</sub> Ом	R <sub>3</sub> Ом	R <sub>4</sub> Ом	R <sub>5</sub> Ом	R <sub>6</sub> Ом
1	1.1	5	0	10	0	4	0	0	1	0	0	0	5	3	∞	5	6	0	2
2	1.2	5	0	10	0	4	0	0	1	0	0	0	5	3	∞	5	6	0	2
3	1.3	5	0	10	0	4	0	0	1	0	0	0	5	3	∞	5	6	0	2
4	1.4	5	0	10	0	4	0	0	1	0	0	0	5	3	∞	5	6	0	2
5	1.1	0	5	0	10	4	0	1	0	5	0	0	0	∞	3	2	5	0	6
6	1.2	0	5	0	10	4	0	1	0	5	0	0	0	∞	3	2	5	0	6
7	1.3	0	5	0	10	4	0	1	0	5	0	0	0	∞	3	2	5	0	6
8	1.4	0	5	0	10	4	0	1	0	5	0	0	0	∞	3	2	5	0	6
9	1.1	0	4	0	0	5	0	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	3	5	3	5
10	1.2	0	4	0	0	5	10	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	3	5	3	5
11	1.3	0	4	0	0	5	10	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	3	5	3	5
12	1.4	0	4	0	0	5	10	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	3	5	3	5
13	1.1	10	0	0	4	5	0	0	4	1,5	0	0	0	5	4	∞	0	4	4
14	1.2	10	0	0	4	5	0	0	4	1,5	0	0	0	5	4	∞	0	4	4
15	1.3	10	0	0	4	5	0	0	4	1,5	0	0	0	5	4	∞	0	4	4
16	1.4	10	0	0	4	5	0	0	4	1,5	0	0	0	5	4	∞	0	4	4
17	1.1	4	0	8	0	5	0	0	1	0	0	0	4	3	∞	5	6	0	2
18	1.2	4	0	8	0	5	0	0	1	0	0	0	4	3	∞	5	6	0	2
19	1.3	4	0	8	0	5	0	0	1	0	0	0	4	3	∞	5	6	0	2
20	1.4	4	0	8	0	5	0	0	1	0	0	0	4	3	∞	5	6	0	2
21	1.1	0	5	0	8	4	0	2	0	3	0	0	0	∞	3	2	5	0	5
22	1.2	0	5	0	8	4	0	2	0	3	0	0	0	∞	3	2	5	0	5
23	1.3	0	5	0	8	4	0	2	0	3	0	0	0	∞	3	2	5	0	5

Окончание табл. 1.1

24	1.4	0	5	0	8	4	0	2	0	3	0	0	0	∞	3	2	5	0	5
25	1.1	0	4	0	0	3	8	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	4	3	4	2
26	1.2	0	4	0	0	3	8	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	4	3	4	2
27	1.3	0	4	0	0	3	8	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	4	3	4	2
28	1.4	0	4	0	0	3	8	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	4	3	4	2
29	1.1	8	0	0	4	5	0	0	4	1,5	0	0	0	4	5	∞	0	4	4
30	1.2	8	0	0	4	5	0	0	4	1,5	0	0	0	4	5	∞	0	4	4
31	1.3	8	0	0	4	5	0	0	4	1,5	0	0	0	4	5	∞	0	4	4
32	1.4	8	0	0	4	5	0	0	4	1,5	0	0	0	4	5	∞	0	4	4
33	1.1	4	0	6	0	3	0	0	1	0	0	0	3	5	∞	5	4	0	2
34	1.2	4	0	6	0	3	0	0	1	0	0	0	3	5	∞	5	4	0	2
35	1.3	4	0	6	0	3	0	0	1	0	0	0	3	5	∞	5	4	0	2
36	1.4	4	0	6	0	3	0	0	1	0	0	0	3	5	∞	5	4	0	2
37	1.1	0	3	0	5	4	0	1	0	5	0	0	0	∞	3	2	5	0	6
38	1.2	0	3	0	5	4	0	1	0	5	0	0	0	∞	3	2	5	0	6
39	1.3	0	3	0	5	4	0	1	0	5	0	0	0	∞	3	2	5	0	6
40	1.4	0	3	0	5	4	0	1	0	5	0	0	0	∞	3	2	5	0	6
41	1.1	0	4	0	0	6	9	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	3	5	3	5
42	1.2	0	4	0	0	6	9	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	3	5	3	5
43	1.3	0	4	0	0	6	9	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	3	5	3	5
44	1.4	0	4	0	0	6	9	1,5	0	4	0	0	0	∞	0	3	5	3	5
45	1.1	10	0	0	4	5	0	0	4	2	0	0	0	5	4	∞	0	4	4
46	1.2	10	0	0	4	5	0	0	4	2	0	0	0	5	4	∞	0	4	4
47	1.3	10	0	0	4	5	0	0	4	2	0	0	0	5	4	∞	0	4	4
48	1.4	10	0	0	4	5	0	0	4	2	0	0	0	5	4	∞	0	4	4
49	1.1	3	0	6	0	4	0	0	1	0	0	0	5	3	∞	5	6	0	2
50	1.2	3	0	6	0	4	0	0	1	0	0	0	5	3	∞	5	6	0	2

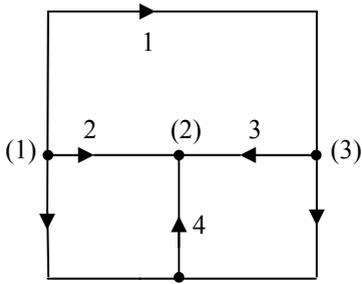


Рис. 1.1.

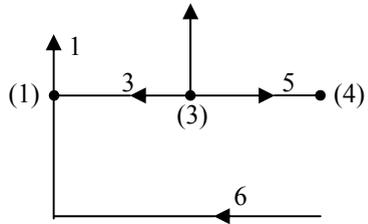


Рис. 1.2.

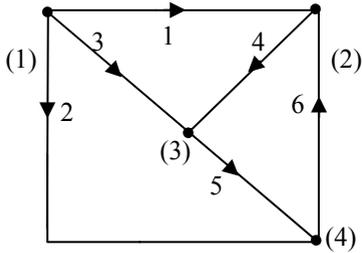


Рис. 1.3

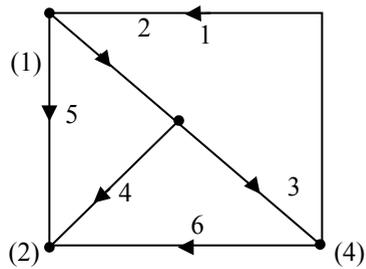


Рис.1.4

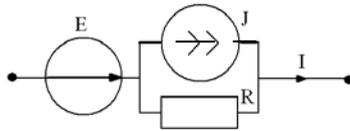


Рис. 1.5

**Пример выполнения расчетно-графической работы № 1**

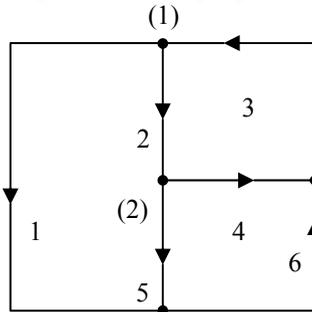


Рис. 1.6

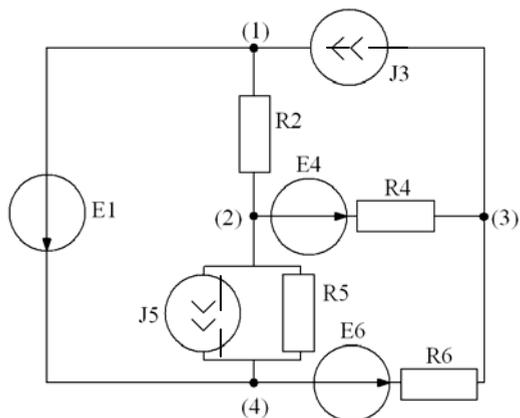


Рис. 1.7

$R_2=3 \text{ Ом}; R_4=5 \text{ Ом}; R_6=2 \text{ Ом}.$

$E_1=2 \text{ В}; E_4=3 \text{ В}; E_6=3 \text{ В}.$

$J_3=1 \text{ А}; J_5=2 \text{ А}.$

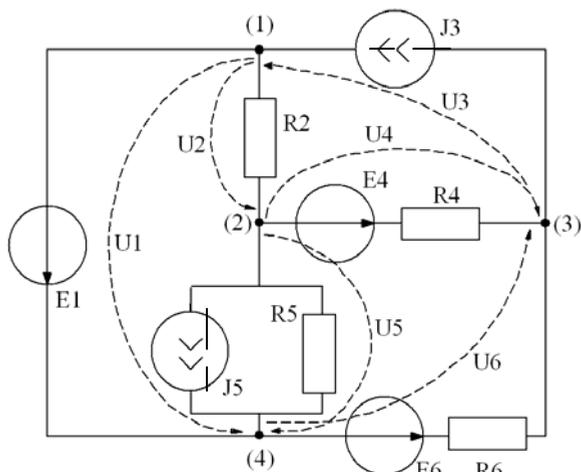


Рис. 1.8

Схема с положительными направлениями токов и напряжений, выбранными по направленному графу.

1. Составить матрицу соединений  $[A]$ :

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \end{bmatrix};$$

$$[A] = \begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix};$$

2. Нарисовать одно из деревьев графа с указанием (штриховой линией) ветвей связи:

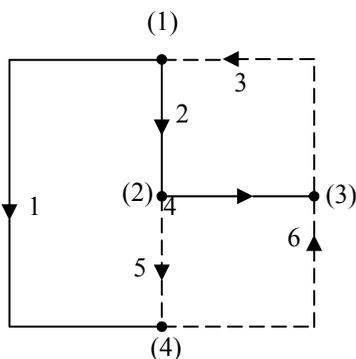


Рис. 1.9.

3. Выбрать главные сечения и составить матрицу сечений  $[D]$ :

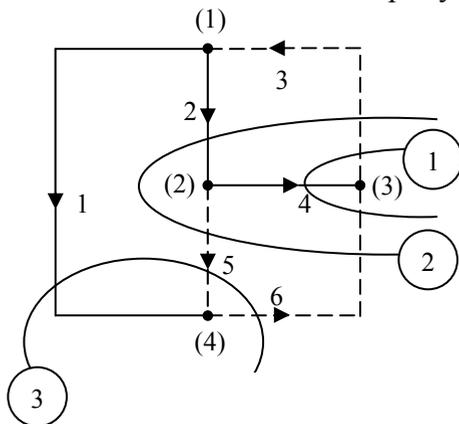


Рис. 1.10

Номера сечений указаны в кружочках.

$$\text{Матрица сечений } [D] = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix};$$

4. Записать с помощью матриц  $[A]$  и  $[D]$  две системы уравнений по 2-му закону Кирхгофа:

а) для узлов  $[A] [I]=0$ :

$$\begin{bmatrix} 1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow \begin{cases} I_1 + I_2 - I_3 = 0 \\ -I_2 + I_4 + I_5 = 0 \\ I_3 - I_4 - I_6 = 0 \end{cases}$$

б) для сечений:  $[D] [I]=0$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & -1 & 0 & -1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \\ I_4 \\ I_5 \\ I_6 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow \begin{cases} -I_3 + I_4 + I_6 = 0 \\ I_2 - I_3 - I_5 + I_6 = 0 \\ I_1 + I_5 + I_6 = 0 \end{cases}$$

5. Выбрать главные контуры и составить матрицу контуров  $[B]$ :

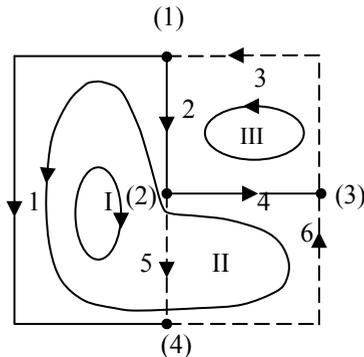


Рис. 1.11

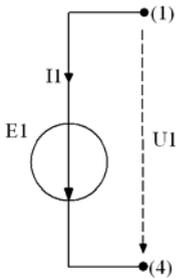
Матрица контуров  $[B] = \begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix};$

6. Записать с помощью матрицы  $[B]$  систему уравнений по 2-му закону Кирхгофа:

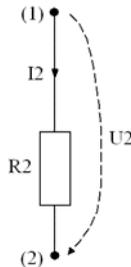
$$[B][U]=0;$$

$$\begin{bmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & -1 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \\ U_4 \\ U_5 \\ U_6 \end{bmatrix} = 0 \Rightarrow \begin{cases} -U_1 + U_2 + U_5 = 0 \\ U_1 - U_2 - U_4 + U_6 = 0 \\ U_2 + U_3 + U_4 = 0 \end{cases}$$

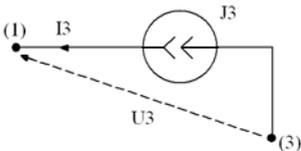
7. Записать для каждой ветви компонентное уравнение (используя обобщенный закон Ома):



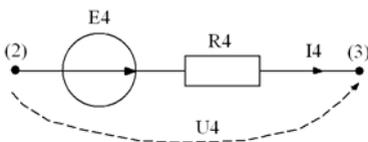
$$\begin{aligned} U_1 &= -E_1 \\ U_1 &= \varphi_1 - \varphi_4 \end{aligned}$$



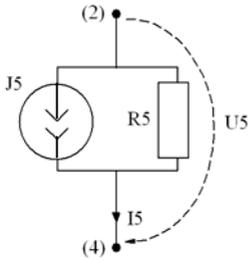
$$\begin{aligned} U_2 &= I_2 R_2 \\ U_2 &= \varphi_1 - \varphi_2 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} I_3 &= J_3 \\ U_3 &= \varphi_1 - \varphi_3 \end{aligned}$$



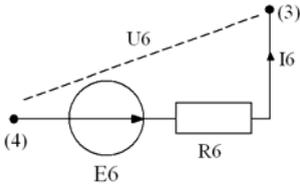
$$\begin{aligned} U_4 &= I_4 R_4 \\ U_4 &= \varphi_2 - \varphi_3 \end{aligned}$$



$$U_{R5} = I_5 - J_5$$

$$U_5 = (I_5 - J_5)R_5$$

$$U_5 = \varphi_2 - \varphi_4$$



$$U_6 = I_6 R_6 - E_6$$

$$U_6 = \varphi_6 - \varphi_3$$

8. Составить систему узловых уравнений, определить потенциалы, напряжения на ветвях и токи в ветвях:

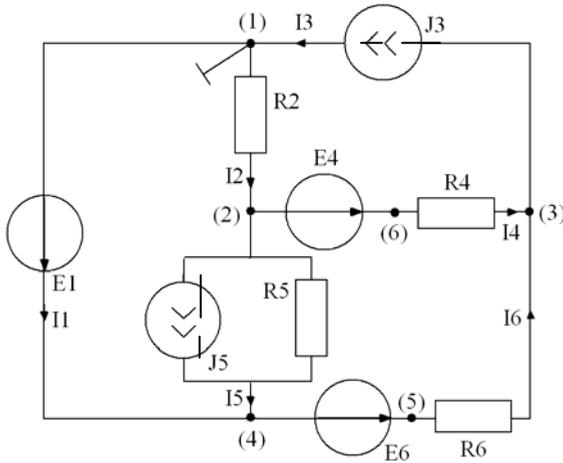


Рис. 1.12

Для решения методом узловых потенциалов принимаем  $\varphi_1 = 0$ .

Система узловых уравнений: число уравнений  $N = N_y - N_B - 1$ , где:  $N_y = 4$  – число узлов,

$N_B=1$  – число вырожденных ветвей (ветви с 1-м источником ЭДС),

т.е. для данной цепи:  $N=4-1-1=2$ .

$$\begin{cases} \varphi_2 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) - \varphi_3 \frac{1}{R_4} - \varphi_4 \frac{1}{R_5} = -E_4 \frac{1}{R_4} - J_5 \\ -\varphi_2 \frac{1}{R_4} + \varphi_3 \left( \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} \right) - \varphi_4 \frac{1}{R_6} = E_4 \frac{1}{R_4} + E_6 \frac{1}{R_6} - J_3 \end{cases};$$

где  $\varphi_4 = E_1$ , т.е.

$$\begin{bmatrix} \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} \right) - \frac{1}{R_4} \\ -\frac{1}{R_4} \left( \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} \right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -E_4 \frac{1}{R_4} + E_1 \frac{1}{R_5} - J_5 \\ E_4 \frac{1}{R_4} + E_6 \frac{1}{R_6} - J_3 + E_1 \frac{1}{R_6} \end{bmatrix};$$

$$\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = 0,33 + 0,2 + 0,2 = 0,77 \text{ Ом}; \quad \frac{1}{R_4} = 0,2 \text{ Ом};$$

$$\frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_6} = 0,2 + 0,5 = 0,7 \text{ Ом}; \quad \frac{1}{R_6} = 0,5 \text{ Ом}; \quad \frac{1}{R_5} = 0,2 \text{ Ом}.$$

$$-E_4 \frac{1}{R_4} + E_1 \frac{1}{R_5} - J_5 = -0,6 + 0,4 - 2 = -2,2 \text{ А};$$

$$E_4 \frac{1}{R_4} + E_6 \frac{1}{R_6} - J_3 + E_1 \frac{1}{R_6} = 0,6 + 1,5 - 1 + 1 = 2,1 \text{ А}.$$

$$\begin{bmatrix} 0,77 - 0,2 \\ -0,2 + 0,7 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varphi_2 \\ \varphi_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -2,2 \\ 2,1 \end{bmatrix}.$$

$$\varphi_2 = \frac{\begin{bmatrix} -2,2 & -0,2 \\ 2,1 & 0,7 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 0,77 & -0,2 \\ -0,2 & 0,7 \end{bmatrix}} = \frac{-1,54 + 0,42}{0,54 - 0,04} = \frac{-1,12}{0,5} = -2,24 \text{ В};$$

$$\varphi_3 = \frac{\begin{bmatrix} 0,77 & -2,2 \\ -0,2 & 2,1 \end{bmatrix}}{0,5} = \frac{1,617 - 0,44}{0,5} = \frac{1,177}{0,5} = 2,354 \text{ B};$$

$$\varphi_1 = 0$$

$$\varphi_2 = -2,24 \text{ B}$$

$$\varphi_3 = 2,354 \text{ B}$$

$$\varphi_4 = 2 \text{ B}$$

$$U_1 = -E_1 = -2 \text{ B}$$

$$U_2 = \varphi_1 - \varphi_2 = 2,24 \text{ B}$$

$$U_3 = \varphi_3 - \varphi_1 = 2,354 \text{ B}$$

$$U_4 = \varphi_2 - \varphi_3 = -4,594 \text{ B}$$

$$U_5 = \varphi_2 - \varphi_4 = -4,24 \text{ B}$$

$$U_6 = \varphi_4 - \varphi_3 = -0,364 \text{ B}$$

Токи в ветвях:  $I_3 = J_3 = 1 \text{ A}$

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2} = \frac{2,24}{3} = 0,74 \text{ A}; \quad I_1 = J_3 - I_2 = 1 - 0,74 = 0,26 \text{ A};$$

$$I_{R5} = \frac{U_5}{R_5} = \frac{-4,24}{5} = -0,848 \text{ A};$$

$$I_{R5} = I_5 - J_5 \Rightarrow I_5 = I_{R5} + J_5 = -0,848 + 2 = 1,152 \text{ A};$$

$$I_4 = \frac{U_4 + E_4}{R_4} = \frac{-4,594 + 3}{5} = \frac{-1,594}{5} = -0,319 \text{ A};$$

$$I_6 = \frac{U_6 + E_6}{R_6} = \frac{-0,354 + 3}{2} = \frac{2,646}{2} = 1,323 \text{ A}.$$

Проверка

$$I_4 - I_2 + I_5 = 0 \Leftrightarrow -0,319 - 0,74 + 1,152 \approx 0.$$

$$I_6 - I_1 + I_5 = 0 \Leftrightarrow 1,323 - 0,26 - 1,152 \approx 0.$$

9. Составить систему контурных уравнений, определить токи в ветвях:

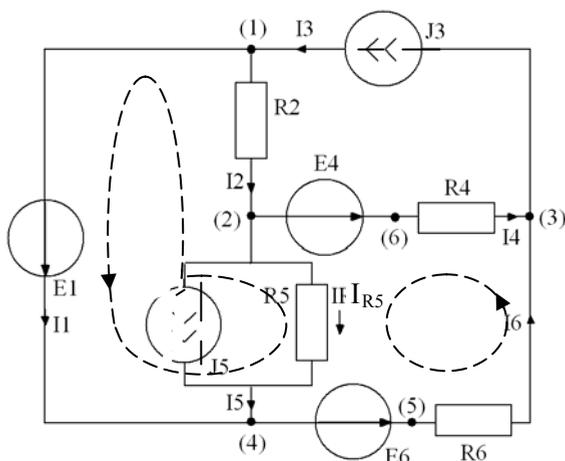


Рис. 1.13

На рисунке выбраны независимые контуры и их направление обхода (положительное направление контурных токов).

Число уравнений равно числу независимых контуров, ветвь с источником тока не может создать независимый контур.

$$N = 2: \begin{cases} I_{k1}(R_2 + R_5) - I_{k2}R_5 - J_3R_2 = E_1; \\ -I_{k1}R_5 + I_{k2}(R_4 + R_6 + R_5) - J_5R_5 - J_3R_4 = E_6 - E_6, \end{cases}$$

т.е.  $J_5$  как контурный ток "замыкаем" через  $R_5$ ,  $J_3$ , через  $R_2$ ,  $E_4$ ,  $R_4$ . В матричной форме

$$\begin{bmatrix} R_2 + R_5 & -R_5 \\ -R_5 & R_4 + R_6 + R_5 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k1} \\ I_{k2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} E_1 - J_5R_5 + J_3R_2 \\ E_6 - E_4 + J_5R_5 + J_3R_4 \end{bmatrix};$$

$$\begin{bmatrix} 8 & -5 \\ -5 & 12 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{k1} \\ I_{k2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 2 - 10 + 3 \\ 3 - 3 + 10 + 5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -5 \\ 15 \end{bmatrix};$$

$$I_{k1} = \frac{\begin{bmatrix} -5 & -5 \\ 15 & 12 \end{bmatrix}}{\begin{bmatrix} 8 & -5 \\ -5 & 12 \end{bmatrix}} = \frac{-60 + 75}{96 - 25} = 0,21 \text{ A};$$

$$I_{k2} = \frac{\begin{bmatrix} 8 & -5 \\ -5 & 15 \end{bmatrix}}{71} = \frac{120 - 25}{71} = 1,33 \text{ A};$$

$$I_1 = I_{k1} = 0,021 \text{ A};$$

$$I_2 = -I_{k1} + J_3 = 0,79 \text{ A};$$

$$I_3 = J_3 = 1 \text{ A};$$

$$I_4 = -I_{k2} + J_3 = -1,33 + 1 = -0,33 \text{ A};$$

$$I_{R5} = -I_{k1} - J_5 + I_{k2} = -0,21 - 2 + 1,33 = -0,88 \text{ A};$$

$$I_5 = J_5 + I_{R5} = 2 - 0,88 = 1,12 \text{ A};$$

$$I_6 = I_{k2} = 1,33 \text{ A}.$$

10. Определить ток  $I_4$  в четвертой ветви эквивалентного генератора:

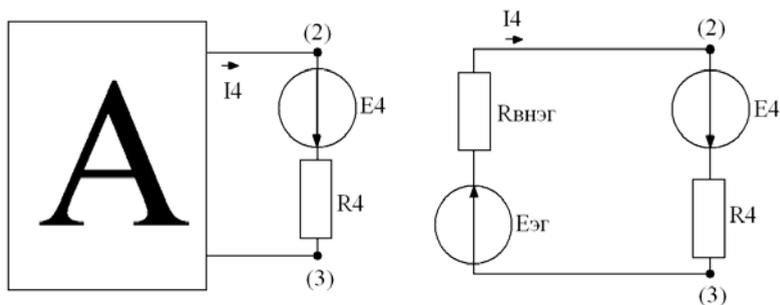


Рис. 1.14

**Ошибка! Закладка не определена.Ошибка! Закладка не определена.**  $I_4 = \frac{E_{ЭГ} + E_4}{R_{ВНЭГ} + R_4};$

$E_{ЭГ}$  – определяем как  $U_{23xx}$ ;

$R_{ВНЭГ}$  – определяем как  $R_{ВН23}$  при разомкнутой четвертой ветви.  
 Эквивалентная схема для определения  $R_{ВНЭГ}$ :

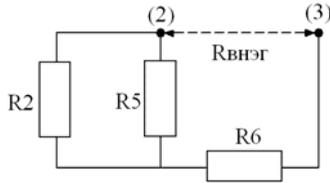


Рис. 1.15

$$R_{ВНЭГ} = R_6 + \frac{R_5 R_2}{R_5 + R_2} = 2 + \frac{15}{8} = 3,88 \text{ Ом};$$

Схема для определения  $E_{ЭГ}$ :  $U_{23xx} = (\varphi_2 - \varphi_3)_{xx}$ ;

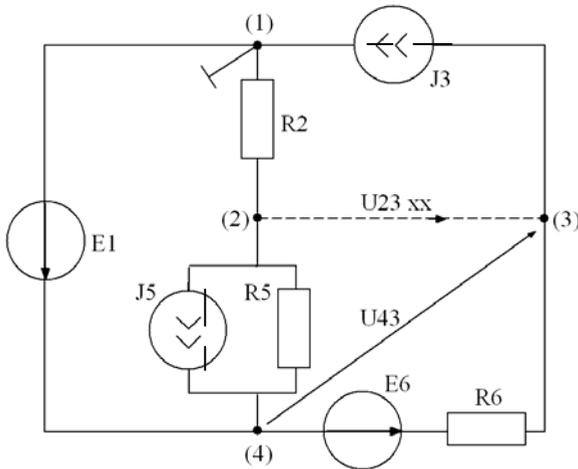


Рис. 1.16

$$\varphi_1 = 0; \quad \varphi_2 \left( \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_5} \right) - \varphi_4 \frac{1}{R_5} = -J_5;$$

пусть  $\varphi_4 = E_1$ :  $\varphi_2(0,33 + 0,2) - 2 \cdot 0,2 = -2$ ;  $\varphi_2 \cdot 0,53 = -1,6$ ;

$$\varphi_2 = -\frac{1,6}{0,53} = -3,01 \text{ В.}$$

$$I = J_3 \Rightarrow \varphi_4 - \varphi_3 = U_{34} = -E_6 + I R_6 = -3 + 2 = -1 \text{ В};$$

$$E_1 - \varphi_3 = -1 \Rightarrow \varphi_3 = 1 + E_1 = 3 \text{ В};$$

$$E_{ЭГ} = U_{23xx} = (\varphi_2 - \varphi_3)_{xx} = -3,01 - 3 = -6,01 \text{ В.}$$

$$I_4 = \frac{E_{ЭГ} + E_4}{R_{ВНЭГ} + R_4} = \frac{-6,01 + 3}{8,88} = -0,33 \text{ А.}$$

11. Проверить соблюдение баланса мощности в электрической цепи. Определить расход энергии за  $t=10$  с.

Мощность, расходуемая источниками:

$$P_u = E_1 I_1 + E_4 I_4 + J_3(-U_3) + E_6 I_6 + J_5(-U_5) = 2 \cdot 0,021 + 3 \cdot (-0,33) + 1 \cdot (-2,35) + 3 \cdot 1,33 + 2 \cdot 4,24 = 0,42 - 0,99 - 2,35 + 3,99 + 8,48 = 9,55 \text{ Вт.}$$

Мощность, рассеиваемая резисторами:

$$P_H = I_2^2 R_2 + I_4^2 R_4 + I_{R5}^2 R_5 + I_6^2 R_6 = 0,79^2 \cdot 3 + (-0,33)^2 \cdot 5 + (-0,88)^2 \cdot 5 + (1,33)^2 \cdot 2 = 1,872 + 0,54 + 3,872 + 3,538 = 9,822 \text{ Вт.}$$

$$P_{II} \approx P_H$$

Энергия, расходуемая за  $t=10$  с. в электрической цепи:

$$W = Pt = 9,55 \cdot 10 = 95,5 \text{ Дж.}$$

12. Для любого контура с двумя источниками ЭДС построить потенциальную диаграмму:

Потенциальная диаграмма, обход по контуру:  $E_1, E_6, R_6, R_4, R_2$ . показана на рис.1.17

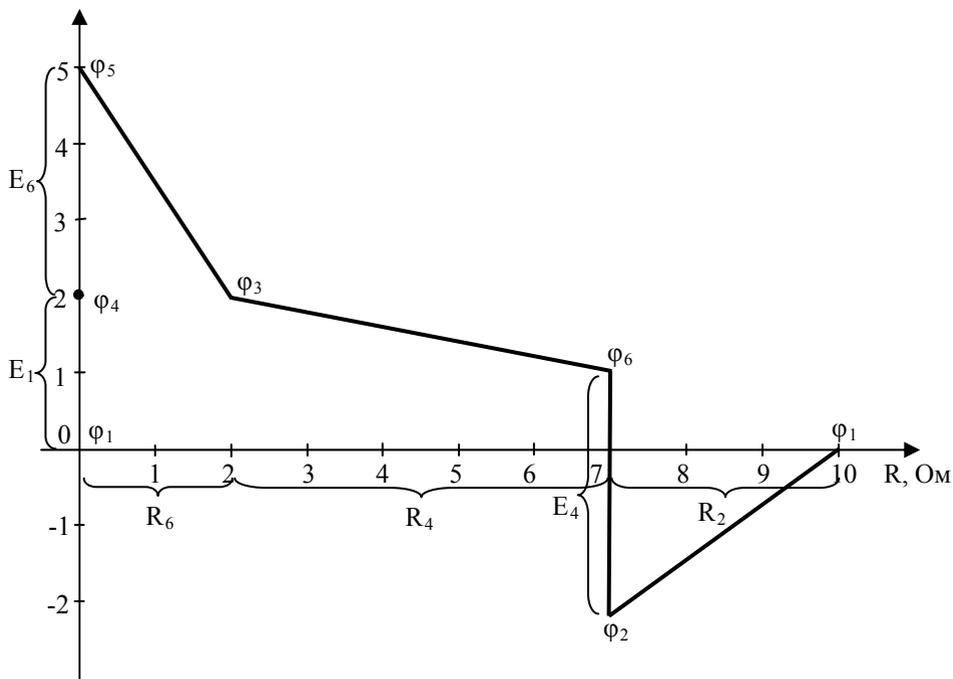


Рис. 1.17

## 2. АНАЛИЗ ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ ОДНОФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА Расчётно-графическая работа № 2

Для электрической схемы, соответствующей номеру варианта (табл. 2.1) и изображенной на рис. 1.22-1.41, выполнить следующее.

1. На основании законов Кирхгофа составить в общем виде систему уравнений для расчёта токов во всех ветвях цепи, записав её в двух формах: а) дифференциальной; б) символической.
2. Определить комплексы действующих значений токов во всех ветвях, воспользовавшись одним из методов расчёта линейных электрических цепей.  
При выполнении п.2 учесть, что одна из ЭДС в табл.2.1 может быть задана косинусоидой (не синусоидой). Чтобы правильно записать её в виде комплексного числа, сначала надо от косинусоиды перейти к синусоиде.
3. По показаниям, полученным в п.2, определить показания ваттметра.
4. Построить топографическую диаграмму, совмещённую с векторной диаграммой токов, потенциал точки *a*, указанной на схеме, принять равным нулю.
5. Используя данные расчётов, полученных в п.2, записать выражение для мгновенного значения токов (см. указание к выбору варианта). Построить график зависимости указанных величин от  $\omega t$ .
6. Полагая, что между двумя любыми индуктивными катушками, расположенными в различных ветвях заданной схемы, имеется магнитная связь при взаимной индуктивности, равной *M*, составить в общем виде систему уравнений по закону Кирхгофа для расчёта токов во всех ветвях схемы, записав её в двух формах: а) дифференциальной; б) символической.
7. Составить баланс мощности в электрической цепи.

Таблица 2.1

№ вар.	№ рис.	L <sub>1</sub>	L <sub>2</sub>	L <sub>3</sub>	C <sub>1</sub>	C <sub>2</sub>	C <sub>3</sub>	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>3</sub>	f, Гц
		мГн			мкФ			Ом			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	2.15	-	6,38	-	10,	∞	-	-	-	10	500
2	2.20	1,27	3,18	-	-	3,98	-	-	-	25	1000
3	2.1	-	1,74	-	-	∞	4,02	17	-	-	1100
4	2.8	1,36	-	5,46	3,25	-	∞	-	65	-	700
5	2.13	-	-	2,63	1,25	-	8,84	-	65	-	2000

6	2.19	-	1,06	2,48	-	-	1,38	17	-	-	1800
7	2.10	1,27	0,8	-	-	6,38	-	-	-	25	1000
8	2.3	40,2	-	0	35,4	-	53	-	25	-	150
9	2.14	-	4,19	1,92	-	0,79	0,74	17	-	-	3000
10	2.4	1,04	-	2,64	,76	-	3,23	-	65	-	2600
11	2.5	160	25	-	0,53	6,6	-	-	-	100	500
12	2.16	-	160	25	-	0,53	6,6	100	-	-	500
13	2.6	-	-	31,8	1,59	-	1,59	-	100	-	1000
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>
14	2.11	15,9	3,98	-	-	1,27	-	-	-	100	1000
15	2.17	-	6,8	-	-	0,91	0,46	100	-	-	3500
16	2.9	6	-	0	0,8	-	0,4	-	100	-	4000
17	2.7	1,6	-	-	$\infty$	0,55	-	-	-	10	5000
18	2.12	0	32	58	$\infty$	-	17,8	60	-	-	300
19	2.2	-	4,98	50	1	7,96	0,4	-	25	-	800
20	2.18	32	36	0	4	2	$\infty$	-	-	70	400
21	2.15	-	12,76	-	10,6	15,9	-	-	-	10	500
22	2.20	2,12	3,98	-	-	7,56	-	-	-	25	600
23	2.1	-	3,47	-	-	$\infty$	8,03	17	-	-	550
24	2.8	0,68	-	5,46	1,62	-	4,73	-	65	-	1400
25	2.13	-	-	2,63	1,25	-	8,84	-	65	-	2000
26	2.19	-	2,12	4,96	-	-	2,76	17	-	-	900
27	2.10	0,64	0,4	-	-	3,19	-	-	-	25	2000
28	2.3	40,2	-	22,8	35,4	-	26,5	-	25	-	150
29	2.14	-	4,19	0	-	0,79	1,47	17	-	-	3000
30	2.4	2,08	-	5,27	1,51	-	6,46	-	65	-	1300
31	2.5	106	41,3	-	1,76	11	-	-	-	100	300
32	2.16	-	66,2	10,3	-	0,22	2,76	100	-	-	1200
33	2.6	-	-	31,8	3,18	-	$\infty$	-	100	-	500
34	2.11	10	2,5	-	-	0,8	-	-	-	100	1590
35	2.17	-	13,6	-	-	1,82	0,91	100	-	-	1750
36	2.9	6	-	4	0,8	-	0,2	-	100	-	4000
37	2.7	4,8	-	-	2,54	1,1	-	-	-	10	2500
38	2.12	0	16	29	$\infty$	$\infty$	8,9	60	-	-	600
39	2.2	-	0	50	1	$\infty$	0,4	-	25	-	800
40	2.18	8	9	6,98	1	0,5	1,42	-	-	70	1600
41	2.15	-	5,3	-	8,84	$\infty$	-	-	-	10	600
42	2.20	2,12	0	-	-	13,2	-	-	-	25	600

43	2.1	-	6,94	-	-	24,1	8,03	17	-	-	550
44	2.8	0,68	-	2,73	1,62	-	$\infty$	-	65	-	1400
45	2.13	-	-	6,35	2,5	-	10	-	65	-	1000
46	2.19	-	2,37	2,79	-	-	3,99	17	-	-	800
47	2.10	1,27	4,78	-	-	3,19	-	-	-	25	1000
48	2.3	10,1	-	5,69	8,85	-	6,62	-	25	-	600
49	2.14	-	1,68	7,65	-	3,16	2,95	17	-	-	750
50	2.4	2,08	-	2,94	1,51	-	$\infty$	-	65	-	1300

Продолжение таблицы 2.1

№ вар.	$e_1', B$	$e_1'', B$	$e_2', B$
1	13	14	15
1	$99 \sin (wt+20^\circ)$	0	$179 \cos (wt+270^\circ)$
2	$70,5 \cos (wt+270^\circ)$	0	-
3	$113 \sin wt$	0	-
4	$141 \sin wt$	0	-
5	$200 \cos wt$	$74,2 \sin (wt+120^\circ)$	-
6	0	$112,8 \cos (wt-95^\circ)$	-
7	$70,5 \cos (wt-70^\circ)$	0	-
8	$70,5 \cos (wt+275^\circ)$	-	$68,5 \cos (wt-174^\circ)$
9	$113 \sin (wt-22^\circ)$	0	-
10	0	$114 \sin (wt+10^\circ)$	-
11	0	$114 \sin wt$	-
12	$282 \sin (wt-135^\circ)$	$400 \cos (wt-30^\circ)$	-
13	-	$169 \sin wt$	$169 \sin (wt+90^\circ)$
14	0	$169 \sin (wt-180^\circ)$	$240 \sin (wt+45^\circ)$
15	$169 \cos (wt-90^\circ)$	$240 \sin (wt+135^\circ)$	$169 \sin (wt+180^\circ)$
16	$169 \sin (wt+180^\circ)$	-	0
17	0	$282 \sin wt$	$282 \cos (wt+90^\circ)$
18	-	-	$689 \cos (wt-78^\circ)$
19	$566 \cos (wt-90^\circ)$	0	-
20	$141 \sin (wt-300^\circ)$	-	$62 \cos (wt-124^\circ)$
21	$99 \sin (wt-340^\circ)$	0	0
22	$70,5 \cos (wt-90^\circ)$	0	-
23	$113,1 \sin wt$	0	-
24	$141 \cos (wt+270^\circ)$	0	-
25	$141 \cos (wt-15^\circ)$	0	-
26	0	$112,8 \sin (wt-5^\circ)$	-

27	$70,5 \sin (wt+20)^\circ$	0	-
28	$70,5 \cos (wt-130^\circ)$	-	$84,6 \sin (wt+317^\circ)$
29	$60 \sin (wt+315^\circ)$	$60 \cos (wt+90^\circ)$	-
30	0	$141 \cos (wt-80^\circ)$	-
31	$141 \cos (wt-90^\circ)$	0	-
32	0	$141 \cos wt$	-
33	-	$169 \sin wt$	$120 \sin (wt+135^\circ)$
34	$169 \sin (wt+90^\circ)$	$240 \sin (wt-135^\circ)$	0
<b>1</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>
35	0	$169 \cos wt$	$169 \sin (wt+90^\circ)$
36	$169 \cos (wt+90^\circ)$	0	$120 \sin (wt-45^\circ)$
37	0	$282 \sin wt$	$282 \cos (wt+90^\circ)$
38	-	-	$705 \cos (wt-37^\circ)$
39	$620 \sin (wt+54^\circ)$	$538 \cos (wt+22^\circ)$	-
40	$141 \sin (wt-300^\circ)$	-	$141 \cos (wt-90^\circ)$
41	$99 \cos (wt+290^\circ)$	0	$155 \sin (wt+30^\circ)$
42	$56 \sin (wt-60^\circ)$	$64,5 \sin (wt-131^\circ)$	-
43	$131,1 \cos (wt-90^\circ)$	0	-
44	$141 \sin wt$	0	-
45	$141 \cos (wt-15^\circ)$	0	-
46	0	$112,8 \cos (wt-95^\circ)$	-
47	$66,5 \sin wt$	$24,2 \cos wt$	-
48	$70,5 \sin (wt-13^\circ)$	-	$84,6 \cos (wt-135^\circ)$
49	$113 \cos (wt-112^\circ)$	0	-
50	0	$141 \sin (wt+10^\circ)$	-

*Окончание таблицы 2.1*

<b>№ вар.</b>	<b><math>e_2''</math>, В</b>	<b><math>e_3'</math>, В</b>	<b><math>e_3''</math>, В</b>
<b>1</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
1	0	-	-
2	-	$84,6 \sin (wt-30^\circ)$	0
3	-	$46,2 \cos (wt-90^\circ)$	$32,4 \sin (wt-90^\circ)$
4	-	$282 \cos (wt-140^\circ)$	0
5	-	$282 \cos (wt+29^\circ)$	0
6	-	$56,4 \sin (wt-40^\circ)$	0
7	-	$84,6 \sin (wt-10^\circ)$	0

8	$56 \sin (wt-170^\circ)$	-	-
9	-	$56,4 \cos (wt-147^\circ)$	-
10	-	$200 \cos (wt-85^\circ)$	$200 \sin (wt-85^\circ)$
11	-	$141 \cos wt$	0
12	-	0	$141 \sin wt$
13	0	$169 \cos (wt+90^\circ)$	0
14	$169 \sin (wt-90^\circ)$	$169 \cos wt$	0
15	0	0	$169 \cos (wt-90^\circ)$
<b>1</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
16	$169 \cos wt$	$169 \sin wt$	0
17	0	-	-
18	$496 \sin (wt-59^\circ 40')$	$705 \sin (wt-53^\circ)$	-
19	-	$705 \sin (wt+180^\circ)$	-
20	$96,4 \sin (wt-201^\circ)$	-	-
21	$179 \cos (wt-90^\circ)$	-	-
22	-	$84,6 \sin (wt+330^\circ)$	0
23	-	$56,6 \cos (wt-125^\circ)$	0
24	-	$282 \sin (wt+310^\circ)$	0
25	-	$282 \sin (wt+25^\circ)$	0
26	-	$56,4 \cos (wt-130^\circ)$	0
27	-	$84,6 \cos (wt-100^\circ)$	0
28	0	-	-
29	-	$56,4 \sin (wt+303^\circ)$	-
30	-	0	$282 \sin (wt-40^\circ)$
31	-	$141 \sin (wt-270^\circ)$	0
32	-	$100 \sin (wt+135^\circ)$	$100 \cos (wt+315^\circ)$
33	$120 \cos (wt-45^\circ)$	$169 \sin (wt-180^\circ)$	0
34	$169 \sin wt$	$169 \cos wt$	0
35	$240 \sin (wt -135^\circ)$	0	$169 \sin wt$
36	$120 \sin (wt+45^\circ)$	$169 \sin wt$	0
37	0	-	-
38	-	$705 \sin (wt-53^\circ)$	-
39	-	$705 \cos (wt+90^\circ)$	-
40	0	-	-
41	$89,5 \cos (wt-150^\circ)$	-	-
42	-	$84,6 \cos (wt-120^\circ)$	0
43	-	$56,6 \sin (wt-35^\circ)$	0

44	-	$181,4 \sin wt$	$216 \cos (wt-180^\circ)$
45	-	0	$282 \sin (wt-335^\circ)$
46	-	$40 \sin (wt+5^\circ)$	$40 \sin (wt-85^\circ)$
47	-	$84,6 \cos (wt-100^\circ)$	0
48	0	-	-
49	-	$56,4 \sin (wt-57^\circ)$	-
50	-	0	$282 \cos (wt -130^\circ)$

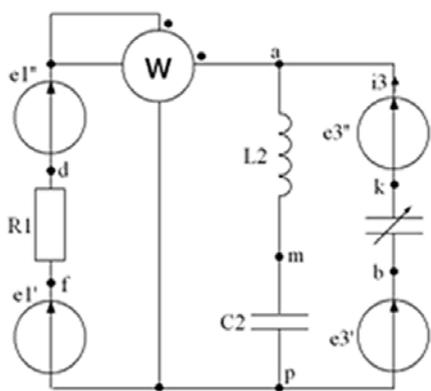


Рис. 2.1

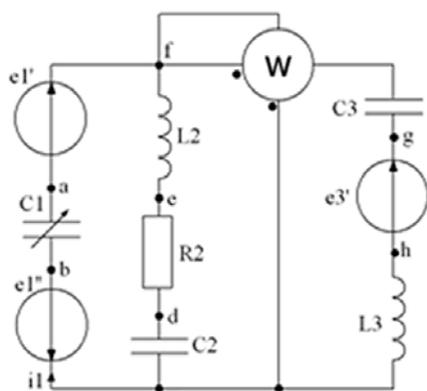


Рис. 2.2

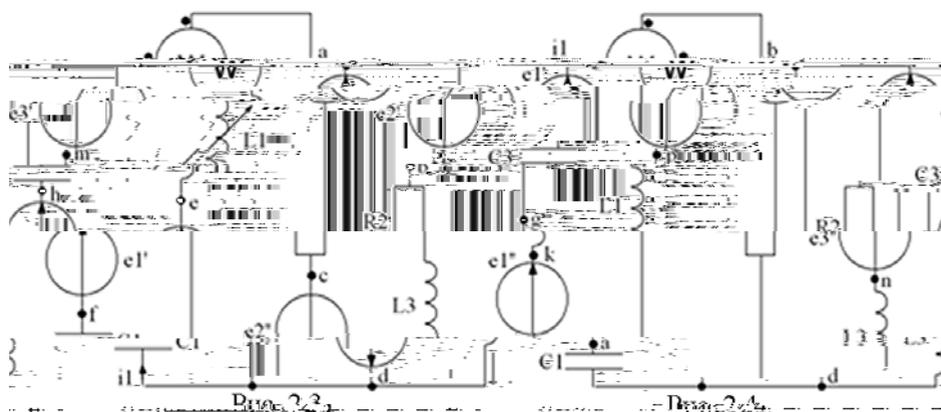


Рис. 2.3

Рис. 2.4

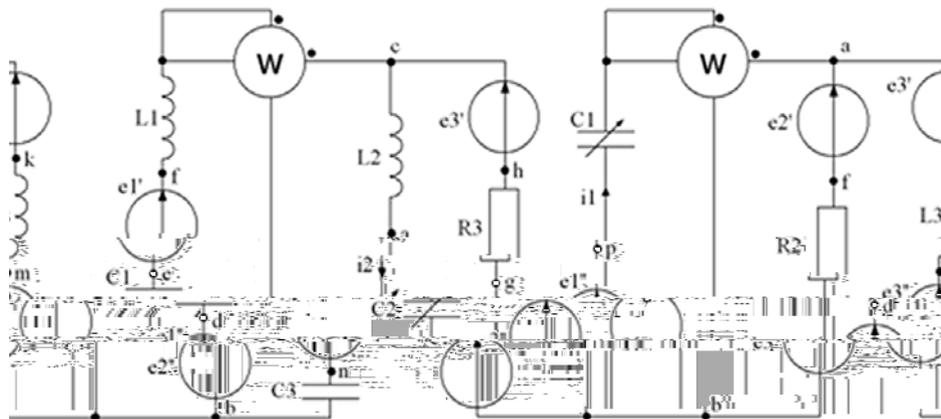


Рис. 2.6

Рис. 2.5

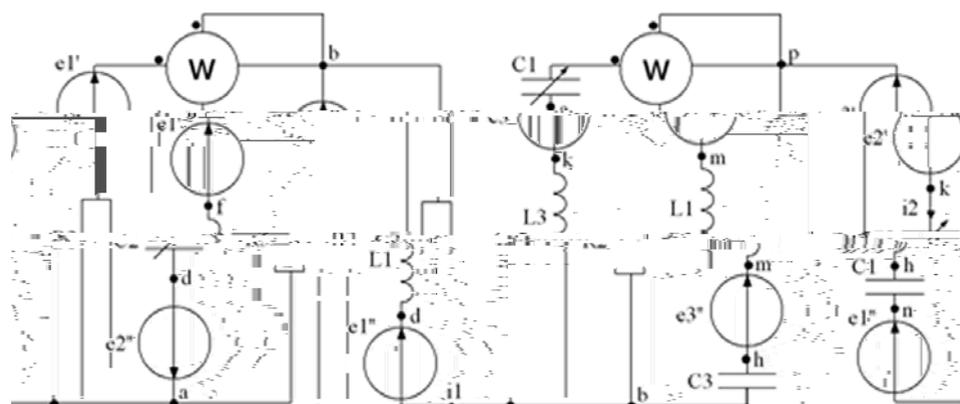


Рис. 2.7

Рис. 2.8

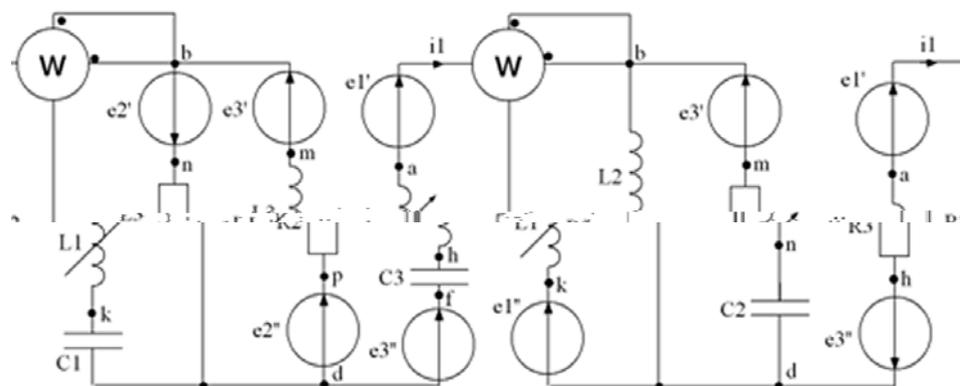


Рис. 2.9

Рис. 2.10

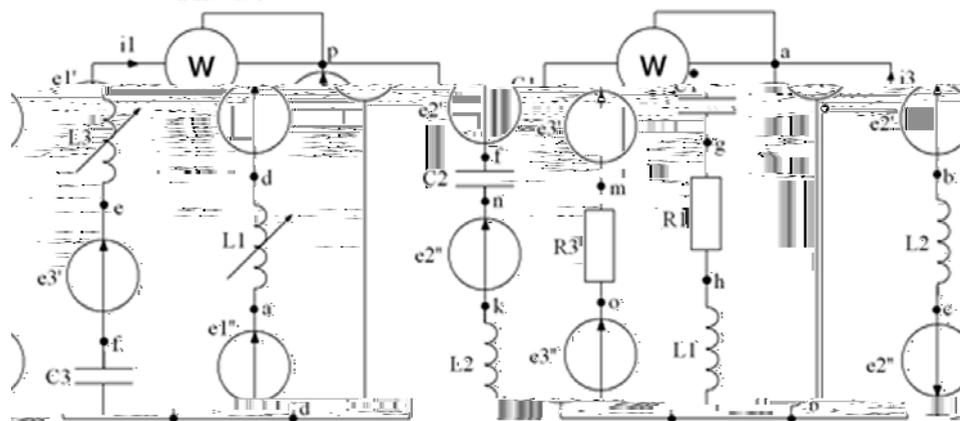


Рис. 2.12

Рис. 2.11

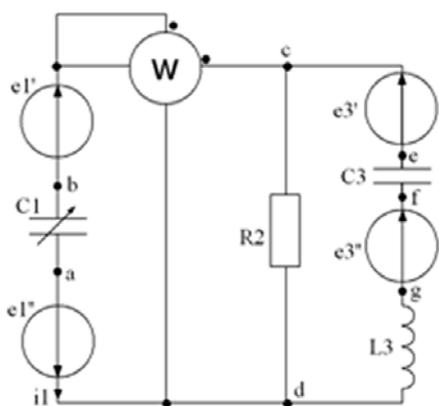


Рис. 2.13

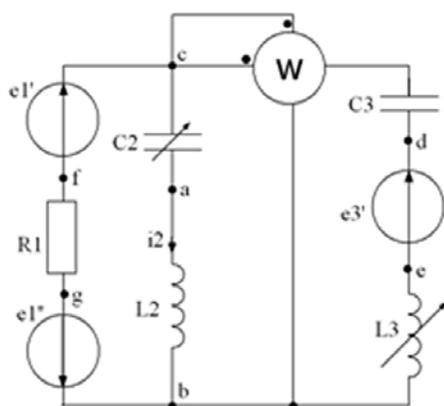


Рис. 2.14

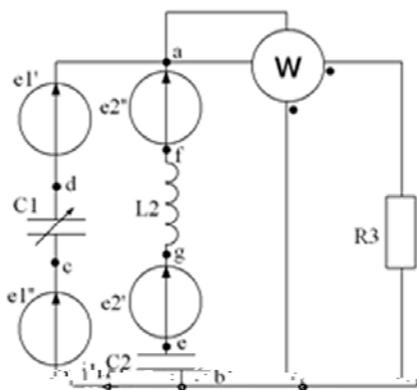


Рис. 2.15

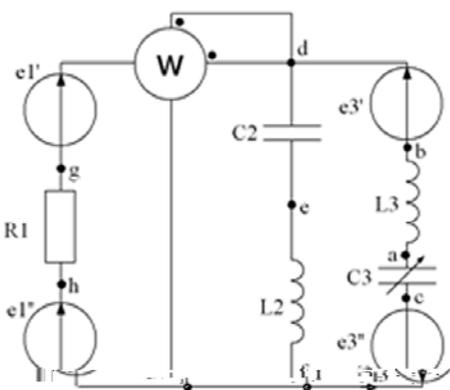


Рис. 2.16

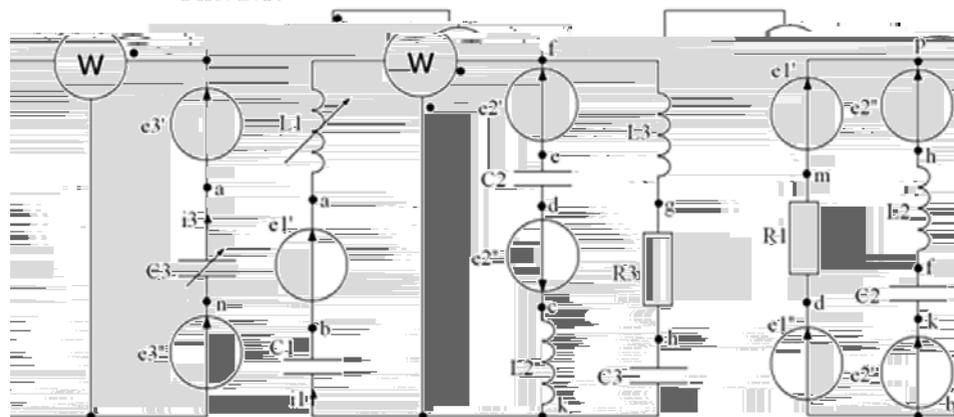


Рис. 2.18

Рис. 2.

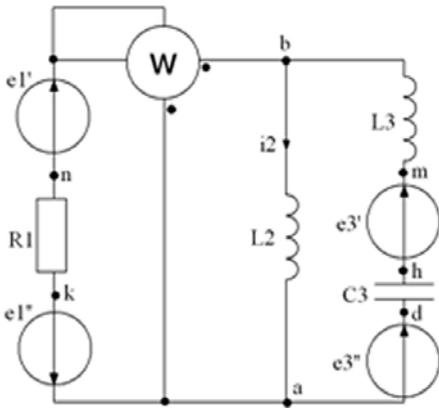


Рис. 2.19

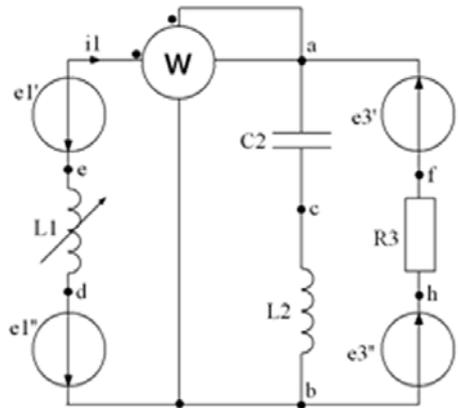


Рис. 2.20

**Пример выполнения расчетно-графической работы №2.**

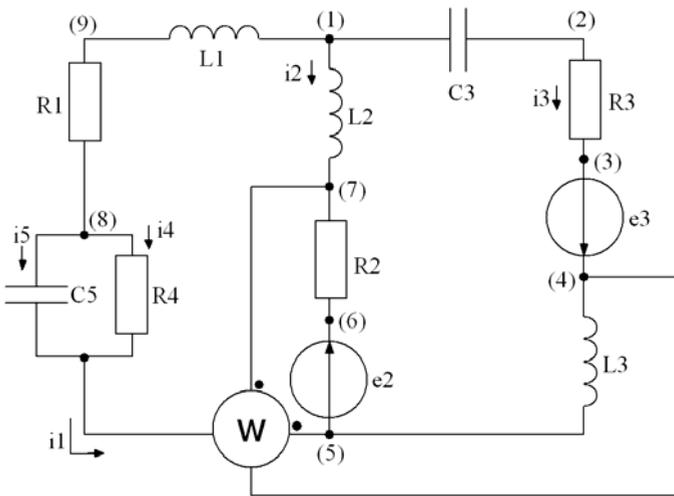


Рис. 2.21

Для схемы на рисунке 2.21 дано:

$$R_1 = 3 \text{ Ом}; L_1 = 0,003 \text{ Гн}; R_2 = 4 \text{ Ом}; L_2 = 0,008 \text{ Гн};$$

$$R_3 = 3 \text{ Ом}; L_3 = 0,004 \text{ Гн}; C_3 = 0,143 \cdot 10^{-3} \text{ Ф}; R_4 = 16,67 \text{ Ом};$$

$$C_5 = 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ Ф};$$

$$e_2 = 200\sqrt{2}\sin 1000t \text{ В}; e_3 = 140\sqrt{2}\sin(1000t + 60^\circ) \text{ В}$$

Подставим исходные данные в комплексной (символической) форме:

$$\dot{E}_2 = 200 \text{ В};$$

$$\dot{E}_3 = 140 e^{j60^\circ} \text{ В};$$

$$jx_{L_1} = j 1000 \cdot 0,003 = j 3 \text{ Ом};$$

$$jx_{L_2} = j 1000 \cdot 0,008 = j 8 \text{ Ом};$$

$$jx_{L_3} = j 4 \text{ Ом};$$

$$-jx_{C_3} = -j \frac{1}{1000 \cdot 0,143 \cdot 10^{-3}} = -j 7 \text{ Ом};$$

$$-jx_{C_5} = -j \frac{1}{1000 \cdot 0,008 \cdot 10^{-3}} = -j 12,5 \text{ Ом};$$

Для упрощения дальнейших расчетов заменим параллельные ветви, содержащие  $R_4$  и  $C_5$  одной эквивалентной ветвью:

$$\underline{Z}_{45} = \frac{R_4(-jx_{C_5})}{R_4 - jx_{C_5}} = \frac{16,67 \cdot (j12,5)}{16,67 - j12,5} = 6 - j8 = 10 e^{-j53,13^\circ} \text{ Ом}$$

Теперь схема замещения имеет вид, представленный на рис. 2.22,

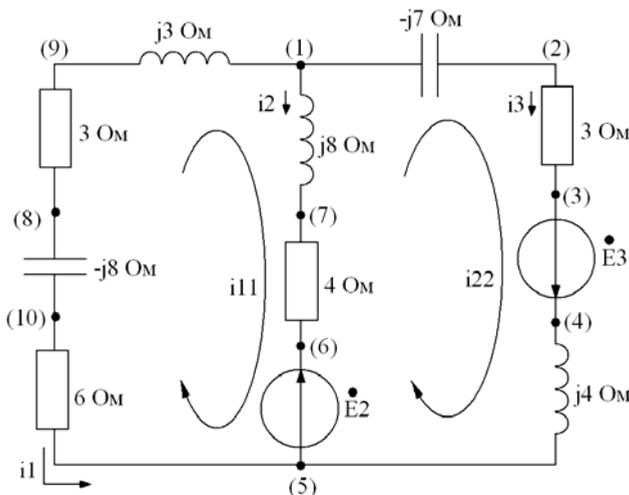


Рис. 2.22

1. Система уравнений Кирхгофа в общем виде в дифференциальной и символической формах имеет вид

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} + i_2 R_2 - i_1 R_{45} - \frac{1}{C_{45}} \int i_1 dt - i_1 R_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} = -e_2 \\ \frac{1}{C_3} \int i_3 dt - i_3 R_3 - L_4 \frac{di_3}{dt} - i_2 R_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} = e_3 + e_2 \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \\ \dot{I}_2 jx_{L_2} + \dot{I}_2 R_2 - \dot{I}_1 R_{45} - \dot{I}_1 (-jx_{C_{45}}) - \dot{I}_1 R_1 - \dot{I}_1 jx_{L_1} = -\dot{E}_2 \\ \dot{I}_3 (-jx_{C_3}) + \dot{I}_3 R_3 + \dot{I}_3 jx_{L_3} - \dot{I}_2 R_4 - \dot{I}_2 jx_{L_2} = \dot{E}_3 + \dot{E}_2 \end{cases}$$

2. Определим комплексы действующих значений токов методом контурных токов. Выбранные положительные направления контурных токов представлены на схеме замещения.

$$\begin{cases} \dot{I}_{11} \underline{Z}_{11} - \dot{I}_{22} \underline{Z}_{12} = -\dot{E}_2 \\ -\dot{I}_{11} \underline{Z}_{12} + \dot{I}_{22} \underline{Z}_{22} = -\dot{E}_2 + \dot{E}_3 \end{cases}$$

где:  $\underline{Z}_{11} = 3 - j8 + 6 + j3 + j8 + 4 = 13 + j3 \text{ Ом}$

$$\underline{Z}_{12} = 4 + j8 \text{ Ом}$$

$$\underline{Z}_{22} = -j7 + 3 + j4 + 4 + j8 = 7 + j5 \text{ Ом}$$

Решение системы уравнений имеет вид:

$$\dot{I}_{11} = -7,804 + j14,65 = 16,6e^{j118,04^\circ} \text{ А}$$

$$\dot{I}_{22} = 19,44 + j2,91 = 19,65e^{j8,46^\circ} \text{ А}$$

Данное решение удобно получить, воспользовавшись машинной программой решения системы алгебраических уравнений с комплексными коэффициентами.

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_{11} = 7,804 - j14,65 = 16,6e^{-j61,96^\circ} \text{ А}$$

Токи ветвей

$$\dot{I}_2 = \dot{I}_{11} - \dot{I}_{22} = -27,24 + j11,73 = 29,66e^{j156,7^\circ} \text{ А}$$

$$\dot{I}_3 = \dot{I}_{22} = 19,44 + j2,91 = 19,65e^{j8,46^\circ} \text{ А}$$

Токи в ветвях 4 и 5 исходной цепи:

$$\dot{I}_4 = \dot{I}_1 \frac{jx_{C_5}}{R_4 - jx_{C_5}} 16,6e^{-j61,96^\circ} \cdot \frac{-j12,5}{16,67 - j12,5} = 9,96e^{-j115^\circ} \text{ А}$$

$$\dot{I}_5 = \dot{I}_1 \frac{R_4}{R_4 - jx_{C_5}} 13,3e^{-j25^\circ} \text{ А}$$

3. Для построения топографической диаграммы за точку отсчета потенциала принимаем узел 5.

Целесообразно идти по каждой из ветвей схемы от точки 5 к точке 1 "навстречу" току:

$$\dot{\varphi}_5 = 0$$

$$\dot{\varphi}_{10} = \dot{I}_1 R_{45} = 16,6e^{-j61,96^\circ} \cdot 6 = 99,6e^{-j61,96^\circ} = 46,82 - j87,9 \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_8 = \dot{\varphi}_{10} + \dot{I}_1 (-jx_{C_{45}}) = -70,38 - j150,33 \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_9 = \dot{\varphi}_8 + \dot{I}_1 R_1 = -46,97 - j194,28 \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_9 + \dot{I}_1 jx_{L_1} = -3 - j171 \text{ В}$$

При движении по средней ветви :

$$\dot{\varphi}_6 = \dot{E}_2 = 220 \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_7 = \dot{\varphi}_6 + \dot{I}_2 R_2 = 91,08 + j46,93 \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_7 + \dot{I}_2 jx_{L_2} = -2,82 - j171 \text{ В}$$

При движении по правой ветви :

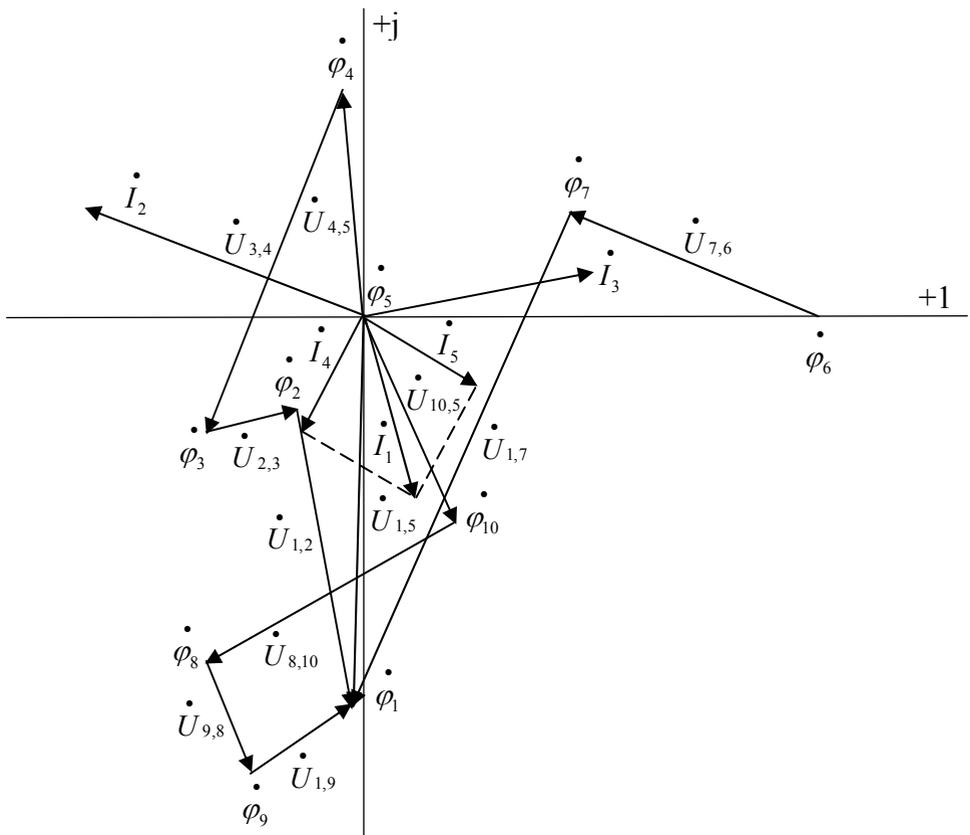
$$\dot{\varphi}_4 = \dot{I}_3 jx_{L_3} = 78,6e^{j98,46^\circ} = -11,56 + j77,74 \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_3 = \dot{\varphi}_4 - \dot{E}_3 = -81,56 - j43,5 \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_2 = \dot{\varphi}_3 + \dot{I}_3 R_3 = -23,26 - j34,79 \text{ В}$$

$$\dot{\varphi}_1 = \dot{\varphi}_2 + \dot{I}_3 (-jx_{C_3}) = -3,02 - j170,8 \text{ В}$$

Различие между полученными значениями  $\dot{\varphi}_1$  несущественно. По полученным результатам строим топографическую диаграмму напряжений, совмещенную с векторной диаграммой токов (рис.2.23)



## 4. Определим показание ваттметра.

Для этого нужно рассчитать  $\dot{U}_{74}$ :

$$\dot{U}_{74} = \dot{\varphi}_7 - \dot{\varphi}_4 = 102,64 - j30,81 = 107,2e^{-j16,7^\circ} \text{ В}$$

$$P_W = \operatorname{Re} \left[ \dot{U}_{74} (-I_1)^* \right] \text{ или } P_W = U_{74} I_1 \cos(\Psi_{U_{74}} - \Psi_{-i_1})$$

$$\Psi_{U_{74}} = -16,7^\circ; \Psi_{-i_1} = 118,04^\circ;$$

$$\text{тогда } P_W = 107,2 \cdot 16,6 \cos(-134,7^\circ) = -1253 \text{ Вт}$$

## 5. Составим баланс мощности:

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{uct} &= -\dot{E}_2 I_2^* + \dot{E}_3 I_3^* = -200 \cdot (-27,54 - j11,53) + 140e^{j60^\circ} (19,44 - j2,92) = \\ &= 7162 = j4500 \text{ ВА} \end{aligned}$$

$$\text{Итак, } P_{uct} = 7162 \text{ Вт}; Q_{uct} = 4500 \text{ ВАр.}$$

$$\begin{aligned} \tilde{S}_{np} &= P_{np} + jQ_{np} = \\ &= \left[ (I_1^2 R_1 + I_4^2 R_4 + I_2^2 R_2 + I_3^2 R_3) + j(I_1^2 x_{L_1} + I_2^2 x_{L_2} + I_3^2 x_{L_3} - I_5^2 x_{C_5}) \right] = \\ &= 7159 + j4502 \text{ ВА}; \end{aligned}$$

$$\text{т.е. } P_{np} = 7159 \text{ Вт}; Q_{np} = 4502 \text{ ВАр}$$

Значит,  $P_{np} = P_{uct}$ ,  $Q_{np} = Q_{uct}$  и  $S_{np} = S_{uct}$  (с погрешностью, определяемой погрешностью расчета).

6. Для цепи с взаимной индуктивностью схема представлена на рис. 2.24.

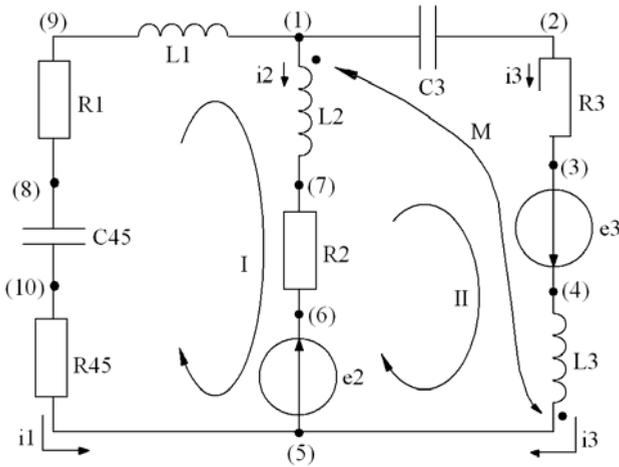


Рис. 2.24

( $L_2$  и  $L_3$  встречно связаны). Взаимная индуктивность  $M$ .

Уравнения Кирхгофа в дифференциальной форме имеют вид

$$\begin{cases} i_1 + i_2 + i_3 = 0 \\ L_2 \frac{di_2}{dt} - M \frac{di_3}{dt} + i_2 R_2 - i_1 R_{45} - \frac{1}{C_{45}} \int i_1 dt - i_1 R_1 - L_1 \frac{di_1}{dt} = -e_2 \\ \frac{1}{C_3} \int i_3 dt - i_3 R_3 - L_3 \frac{di_3}{dt} - M \frac{di_2}{dt} - i_2 R_2 - L_2 \frac{di_2}{dt} + M \frac{di_3}{dt} = e_3 + e_2 \end{cases}$$

В символической форме эти уравнения будут иметь вид:

$$\begin{cases} \dot{I}_1 + \dot{I}_2 + \dot{I}_3 = 0 \\ \dot{I}_2 jx_{L_2} - \dot{I}_3 jx_M + \dot{I}_2 R_2 - \dot{I}_1 R_{45} - \dot{I}_1 (-jx_{C_{45}}) - \dot{I}_1 R_1 - \dot{I}_1 jx_{L_1} = -\dot{E}_2 \\ \dot{I}_3 (-jx_{C_3}) + \dot{I}_3 R_3 + \dot{I}_3 jx_{L_3} - \dot{I}_2 jx_M - \dot{I}_2 R_2 - \dot{I}_2 jx_{L_2} + \dot{I}_3 jx_M = \dot{E}_3 + \dot{E}_2 \end{cases}$$

### 3. ЛИНЕЙНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЦЕПИ ТРЕХФАЗНОГО СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

#### Расчётно-графическая работа № 3

К симметричному трехфазному генератору через сопротивления подключены два приемника, соединенные либо в звезду, либо в треугольник. Вследствие аварии произошло замыкание накоротко одного из сопротивлений или разрыв цепи (место разрыва на схемах указано соответствующим рубильником); электрическая цепь стала несимметричной.

Необходимо проделать следующее:

1. Определить токи во всех ветвях схемы методом двух узлов.
2. Построить в одной комплексной плоскости топографическую и векторную диаграммы токов.
3. Найти активную, реактивную и полную мощности трехфазной цепи.
4. Составить баланс активных мощностей.

На топографической диаграмме должны быть указаны векторы напряжения на всех элементах цепи.

Таблица 3.1

№ вар.	№ рис.	$E_A, В$	$R_1, Ом$	$R_2, Ом$	$R_3, Ом$	$X_{L1}, Ом$	$X_{L2}, Ом$	$X_{L3}, Ом$	$X_{C1}, Ом$	$X_{C2}, Ом$	$X_{C3}, Ом$
1	3.1	127	1	1	1	10	10	10	5	5	5
2	3.2	220	2	2	2	9	9	9	6	6	6
3	3.3	380	3	3	3	8	8	8	7	7	7
4	3.4	127	4	4	4	7	7	7	8	8	8
5	3.5	220	5	5	5	6	6	6	9	9	9
6	3.6	380	6	6	6	5	5	5	10	10	10
7	3.7	127	7	7	7	4	4	4	1	1	1
8	3.8	220	8	8	8	3	3	3	2	2	2
9	3.9	380	9	9	9	2	2	2	3	3	3
10	3.10	660	10	10	10	1	1	1	4	4	4
11	3.10	127	1	1	1	10	10	10	5	5	5
12	3.9	220	2	2	2	9	9	9	6	6	6
13	3.8	380	3	3	3	8	8	8	7	7	7
14	3.7	127	4	4	4	7	7	7	8	8	8
15	3.6	220	5	5	5	6	6	6	9	9	9

Окончание табл. 3.1

№ вар.	№ рис.	$E_A,$ В	$R_1,$ Ом	$R_2,$ Ом	$R_3,$ Ом	$X_{L1},$ Ом	$X_{L2},$ Ом	$X_{L3},$ Ом	$X_{C1},$ Ом	$X_{C2},$ Ом	$X_{C3},$ Ом
16	3.5	380	6	6	6	5	5	5	10	10	10
17	3.4	127	7	7	7	4	4	4	1	1	1
18	3.3	220	8	8	8	3	3	3	2	2	2
19	3.2	380	9	9	9	2	2	2	3	3	3
20	3.1	660	10	10	10	1	1	1	4	4	4
21	3.6	127	1	1	1	10	10	10	5	5	5
22	3.7	220	2	2	2	9	9	9	6	6	6
23	3.8	380	3	3	3	8	8	8	7	7	7
24	3.9	127	4	4	4	7	7	7	8	8	8
25	3.10	220	5	5	5	6	6	6	9	9	9
26	3.1	380	6	6	6	5	5	5	10	10	10
27	3.2	127	7	7	7	4	4	4	1	1	1
28	3.3	220	8	8	8	3	3	3	2	2	2
29	3.4	380	9	9	9	2	2	2	3	3	3
30	3.5	660	10	10	10	1	1	1	4	4	4
31	3.3	127	1	1	1	10	10	10	5	5	5
32	3.4	220	2	2	2	9	9	9	6	6	6
33	3.5	380	3	3	3	8	8	8	7	7	7
34	3.6	127	4	4	4	7	7	7	8	8	8
35	3.7	220	5	5	5	6	6	6	9	9	9
36	3.8	380	6	6	6	5	5	5	10	10	10
37	3.9	127	7	7	7	4	4	4	1	1	1
38	3.10	220	8	8	8	3	3	3	2	2	2
39	3.1	380	9	9	9	2	2	2	3	3	3
40	3.2	660	10	10	10	1	1	1	4	4	4
41	3.4	127	1	1	1	10	10	10	5	5	5
42	3.5	220	2	2	2	9	9	9	6	6	6
43	3.6	380	3	3	3	8	8	8	7	7	7
44	3.7	127	4	4	4	7	7	7	8	8	8
45	3.8	220	5	5	5	6	6	6	9	9	9
46	3.9	380	6	6	6	5	5	5	10	10	10
47	3.10	127	7	7	7	4	4	4	1	1	1
48	3.1	220	8	8	8	3	3	3	2	2	2
49	3.2	380	9	9	9	2	2	2	3	3	3
50	3.3	660	10	10	10	1	1	1	4	4	4

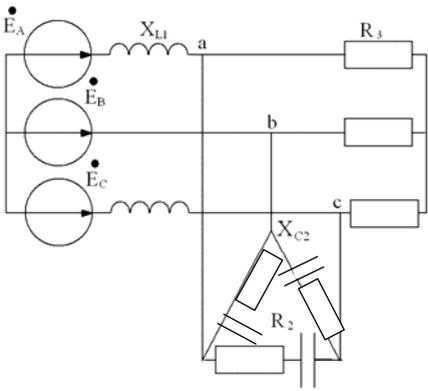


Рис. 3.1

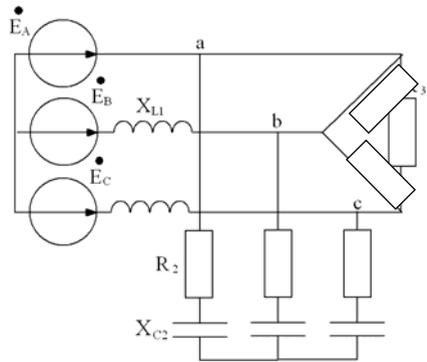


Рис. 3.2

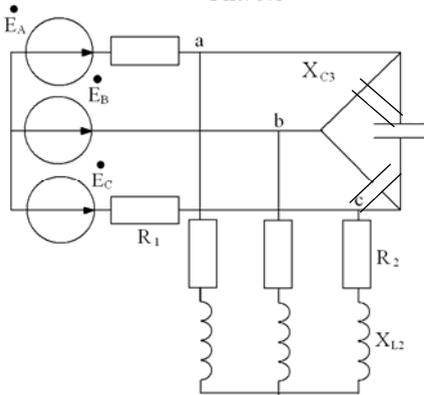


Рис. 3.3

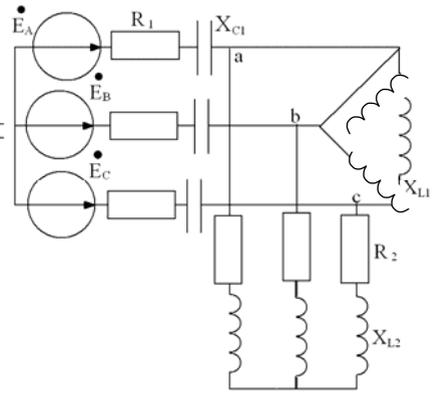


Рис. 3.4

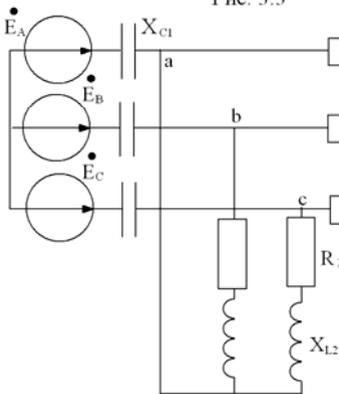


Рис. 3.5

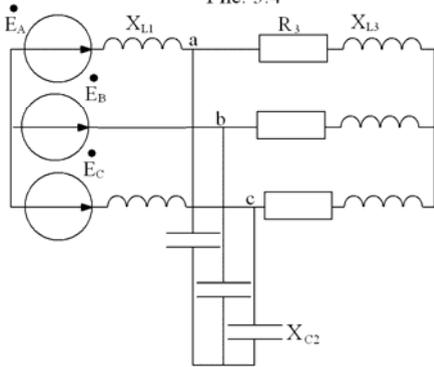


Рис. 3.6

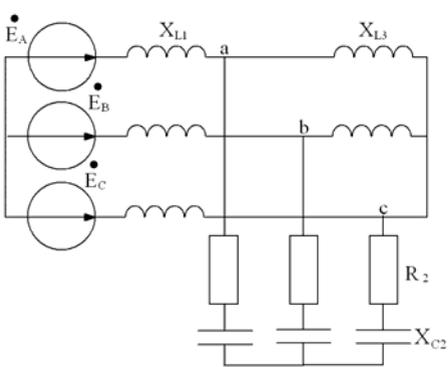


Рис. 3.7

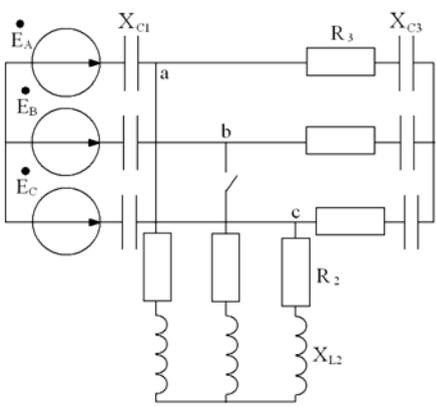


Рис. 3.8

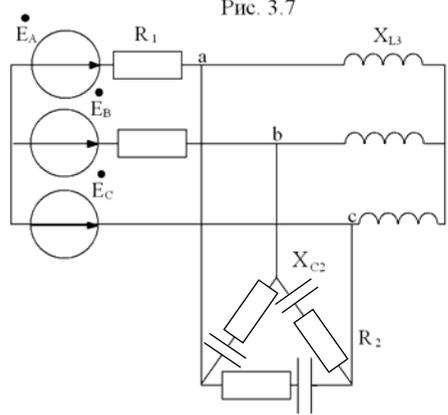


Рис. 3.9

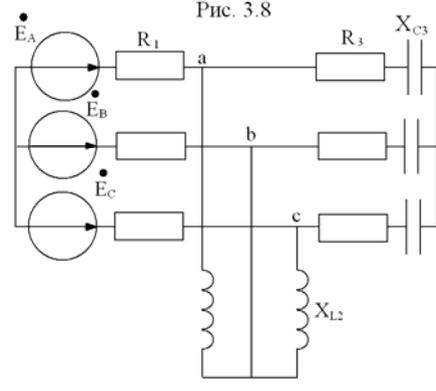


Рис. 3.10

### Пример

Определить токи в ветвях цепи методом двух узлов:

- $R_1 = R_2 = R_3 = 15 \text{ Ом};$
- $X_{L1} = X_{L2} = X_{L3} = 12 \text{ Ом};$
- $X_{C1} = X_{C2} = X_{C3} = 20 \text{ Ом};$
- $E_A = 270 \text{ В};$

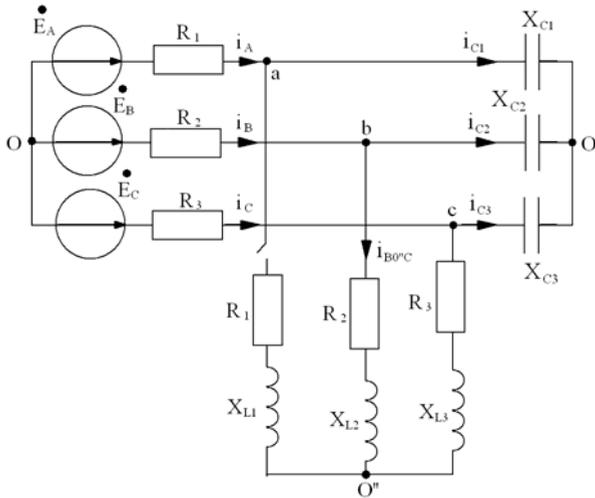


Рис. 3.11

Преобразуем звезду  $O'$  в эквивалентный треугольник:

$$\underline{Y}_{Cab} = \frac{\frac{j}{-jX_C} \cdot \frac{j}{-jX_C}}{3 \frac{1}{-jX_C}} = \frac{1}{-j3X_C}; \quad -jX_{Cab} = \frac{1}{\underline{Y}_{Cab}} = -j3X_C;$$

Аналогично – для  $Y_{Cbc}$  и  $Y_{Cca}$ :

$$-jX_{Cca} = -j3X_C = -j60 \text{ Ом};$$

$$-jX_{Cbc} = -j3X_C = -j60 \text{ Ом};$$

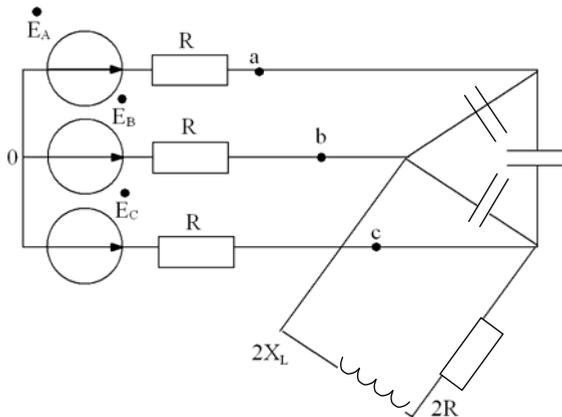


Рис. 3.12

$$\begin{aligned} \underline{Z}_{bc} &= \frac{-3jX_C \cdot (2R + j2X_L)}{-3jX_C + j2X_L + 2R} = \frac{-j60(30 + j24)}{30 - j36} = \frac{-j1800 + 1440}{30 - j36} = \\ &= \frac{(1449 - j1800) \cdot (30 - j36)}{2196} = \frac{43200 - j54000 + j51840 + 64800}{2196} = \\ &= 49,2 - j0,984 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

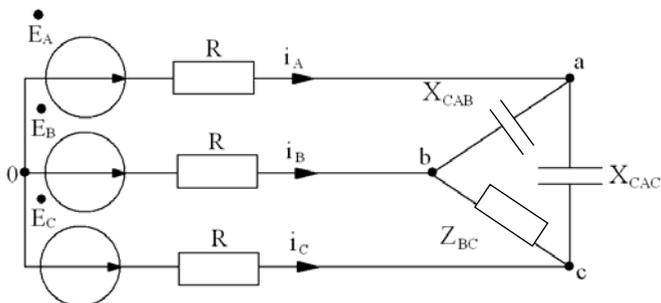


Рис. 3.13

Перейдем от треугольника к эквивалентной звезде:

$$\begin{aligned} \underline{Z}_a &= \frac{-jX_{Cab} \cdot (-jX_{Cac})}{\underline{Z}_{bc} - jX_{Cab} - jX_{Cac}} = \frac{-j60 \cdot (-j60)}{49,2 - j0,984 - j120} = \frac{-3600}{49,2 - j121} = \\ &= \frac{-3600 \cdot (49,2 + j121)}{17062} = -10,4 - j25,53 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_b &= \frac{-j60 \cdot (49,2 - j0,984) \cdot (49,2 + j121)}{17962} = -j8,51 - 0,17 + 20,9 - \\ &- j0,42 = 20,76 - j8,93 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \underline{Z}_c &= \frac{-jX_{Cac} \cdot \underline{Z}_{bc} \cdot (49,2 + j121)}{17062} = \\ &= \frac{-j60 \cdot (49,2 - j0,984) \cdot (49,2 + j121)}{17062} = 20,76 - j8,93 \text{ Ом}; \end{aligned}$$

$$\underline{Z}_A = R + \underline{Z}_a = 15 - 10,4 - j25,53 = 4,6 - j25,53 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_B = R + \underline{Z}_b = 15 + 20,76 - j8,93 = 35,76 - j8,93 \text{ Ом};$$

$$\underline{Z}_C = R + \underline{Z}_c = 15 + 20,76 - j8,93 = 35,76 - j8,93 \text{ Ом};$$

$$\underline{Y}_A = \frac{1}{\underline{Z}_A} = \frac{4,6 + j25,53}{(4,6 - j25,53) \cdot (4,6 + j25,53)} = \frac{4,6 + j25,53}{672,9} = 0,00684 + j0,0379 \text{ Ом};$$

$$\underline{Y}_B = \frac{35,76 + j8,93}{1358,5} = 0,0269 + j0,00657 \text{ Ом};$$

$$\underline{Y}_C = 0,0269 + j0,00657 \text{ Ом};$$

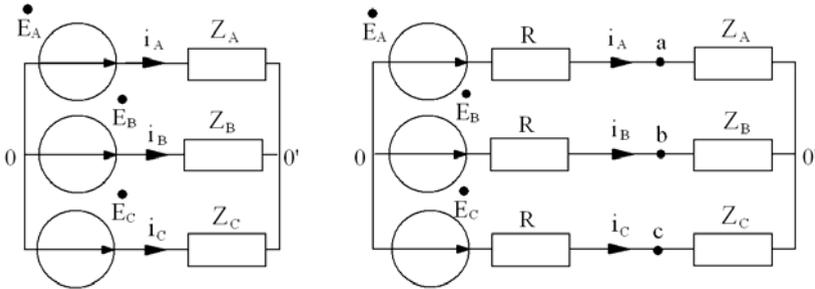


Рис. 3.14

$$\begin{aligned} U_{O'O} &= \frac{E_A \underline{Y}_A + E_B \underline{Y}_B + E_C \underline{Y}_C}{\underline{Y}_A + \underline{Y}_B + \underline{Y}_C} = 270 \frac{(0,00684 + j0,0379)}{0,05944 + j0,05104} + \\ &+ \frac{(-0,5 - j0,866)((0,0263 + j0,00657) + (0,0263 + j0,00657))}{0,05944 + j0,05104} = \\ &= 270 \frac{0,00684 + j0,0379 - 0,01315 - j0,0228 - j0,003285 + 0,00571 -}{0,0597 + j0,05104} \\ &\frac{-0,01515 + j0,0228 - j0,003285 - 0,00571}{0,0597 + j0,05104} = 270 \frac{-0,01946 + j0,03133}{0,05944 + j0,05104} = \\ &= 270 \frac{(-0,01946 + j0,03133)(0,05944 + j0,05104)}{6,138 \cdot 10^{-3}} = 270 * \\ &* \frac{-1,157 \cdot 10^{-3} + j1,862 \cdot 10^{-3} + j0,993 \cdot 10^{-3} + 1,6 \cdot 10^{-3}}{6,138 \cdot 10^{-3}} = 19,44 + j125,6 \text{ В}; \end{aligned}$$

$$\dot{I}_A = \frac{E_A - U_{O'O}}{\underline{Z}_A} = \frac{270 - 19,44 - j125,6}{4,6 - j25,53} = \frac{(251 - j125,6)(4,6 + j25,53)}{672,9} =$$

$$= 1,716 - j0,857 + j9,52 + 4,75 = 6,477 + j8,646 = 10,8e^{j53,96} \text{ A};$$

$$\dot{I}_B = \frac{E_B - U_{O'O}}{\underline{Z}_B} = -1,7 - j10,48 = 10,62e^{-j99,22} \text{ A};$$

$$\dot{I}_C = \frac{E_C - U_{O'O}}{\underline{Z}_C} = -4,775 + j1,835 = 5,1e^{j159} \text{ A};$$

Определим напряжение  $\dot{U}_{bc}$ :

$$\dot{\varphi}_b = \dot{\varphi}_c - \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_C + \dot{I}_B \cdot \underline{Z}_B;$$

$$\dot{U}_{bc} = \dot{I}_B \cdot \underline{Z}_B - \dot{I}_C \cdot \underline{Z}_C = (20,76 - j8,93)(1,7 - j10,48 + 4,775 - j1,833) \text{ B};$$

т.к.  $\underline{Z}_b = \underline{Z}_c = 20,76 - j8,93 \text{ Ом};$

$$\dot{U}_{bc} = (20,76 - j8,93)(3,075 - j12,31) = -46,09 - j283,1 \text{ B};$$

Определим ток  $\dot{I}_{bO'OC}$ :

$$\dot{I}_{bO'OC} = \frac{U_{bc}}{2R + 2jX_L} = -\frac{46,09 + j283,1}{30 + j24} = -5,54 - j5 = -7,46e^{j42,09} \text{ A};$$

Определим токи  $\dot{I}_{C1}; \dot{I}_{C2}; \dot{I}_{C3}$ :

$$\dot{I}_{C1} = \dot{I}_A = 6,477 + j8,646 = 10,8e^{j53,16} \text{ A};$$

$$\dot{I}_{C2} = \dot{I}_B - \dot{I}_{bO'OC} = -1,7 - j10,48 + 5,54 + j5 = 3,84 - j5,648 = 6,669e^{-j55} \text{ A};$$

$$\dot{I}_{C3} = \dot{I}_C + \dot{I}_{bO'OC} = -4,775 + j1,833 - 5,54 - j5 = -10,63 - j3,617 = -10,68e^{j17,09} \text{ A}.$$

Определим полную, активную и реактивную мощности трех-фазной цепи:

$$\begin{aligned} \tilde{S} &= \dot{E}_A \cdot I_A^* + \dot{E}_B \cdot I_B^* + \dot{E}_C \cdot I_C^* = 270(6,477 - j8,646) + \\ &+ (-135 - j233,8)(-1,7 + j10,48) + (-135 + j233,8)(-4,775 - j1,833) = \\ &= 1748,8 - j2334,4 + 229,5 + j397,5 - j1414,8 + 2450,2 + 644,6 - j1116,4 + \\ &+ j247,5 + 428,6 = 5501,7 - j4220,6 = 6934e^{-j37,49} \text{ ВА}; \end{aligned}$$

$$S = 6934 \text{ В} \cdot \text{А};$$

$$P = 5501,7 \text{ Вт};$$

$$Q = 4220,6 \text{ ВАр}.$$

Определим мощность на активных сопротивлениях цепи:

$$\begin{aligned} P_{\text{ц}} &= R(I_A^2 + I_B^2 + I_C^2) + 2R \cdot I_{\text{бо}^{\circ}\text{оС}}^2 = \\ &= 15(116,64 + 112,78 + 26,16) + 30 \cdot 55,65 = 3833,7 + 1669,5 = 5503,2 \text{ Вт}; \end{aligned}$$

$$P \approx P_{\text{ц}}$$

$$5501,7 \approx 5503,2$$

#### 4. ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ В ЛИНЕЙНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЯХ

##### Расчётно-графическая работа № 4

##### Указания

Номер схемы соответствующий номеру варианта, активное сопротивление, индуктивность, ёмкость и начальная фаза синусоидально изменяющейся ЭДС заданы в табл. 4.1.

##### Задача

1. В заданной электрической цепи с источником постоянной ЭДС  $E = 100 \text{ В}$  происходит коммутация.

Требуется: рассчитать ток на индуктивности операторным методом и ток через ёмкость классическим методом.

2. ЭДС источника напряжения изменяется с частотой  $\omega = 1000$  рад/с по синусоидальному закону. Амплитуда ЭДС равна  $E_m = 100$  В.

Коммутация происходит в момент времени  $t = 0$ . До коммутации цепь работает в установившемся режиме.

Необходимо: определить классическим методом ток в одной из параллельных ветвей и операторным методом ток через источник.

Таблица 4.1

№ вар.	№ рис.	R, Ом	L, Гн	C, Ф	Ψ, град
1	4.1	5	5E-3	(1/36)E-3	10
2	4.2	10	5E-3	(5/2)E-2	20
3	4.3	5	2E-2	(1/9)E-5	30
4	4.4	10	5E-3	(1/2)E-4	40
5	4.5	5	1E-2	1E-4	50
6	4.6	10	2E-2	(1/18)E-3	60
7	4.7	20	3E-2	(5/4)E-5	70
8	4.8	25	4E-2	2E-5	80
9	4.9	20	1,5E-3	5E-5	90
10	4.10	10	5E-2	(15/36)E-4	100
11	4.1	10	5E-2	(15/36)E-4	110
12	4.2	20	1,5E-3	5E-5	120
13	4.3	25	4E-2	2E-5	130
14	4.4	20	3E-2	(5/4)E-5	140
15	4.5	10	2E-2	(1/18)E-5	150
16	4.6	5	1E-2	1E-4	160
17	4.7	10	5E-3	(1/2)E-4	170
18	4.8	5	2E-2	(1/9)E-5	180
19	4.9	10	5E-3	(5/2)E-2	190
20	4.10	5	5E-3	(1/36)E-3	200
21	4.1	5	1E-2	1E-4	210
22	4.2	10	5E-3	(1/2)E-4	220
23	4.3	5	2E-2	(1/9)E-3	230
24	4.4	10	5E-3	(5/2)E-2	240
25	4.5	5	5E-3	(1/36)E-3	250
26	4.6	5	2E-2	(1/9)E-5	260
27	4.7	10	1E-3	(1/2)E-4	270

Окончание табл.4.1

№ вар.	№ рис.	R, Ом	L, Гн	C, Ф	Ψ, град
28	4.8	5	5E-3	1E-4	280
29	4.9	10	3E-2	(5/4)E-5	290
30	4.10	5	4E-2	2E-5	300
31	4.1	10	1,5E-2	5E-5	310
32	4.2	20	5E-2	(15/36)E-4	320
33	4.3	25	5E-2	(15/36)E-4	330
34	4.4	20	1,5E-3	5E-5	340
35	4.5	10	4E-2	2E-5	350
36	4.6	10	3E-2	(5/4)E-5	20
37	4.7	20	2E-2	(1/18)E-5	30
38	4.8	25	1E-2	1E-4	40
39	4.9	20	5E-3	(1/2)E-4	50
40	4.10	10	2E-2	(1/9)E-5	60
41	4.1	5	5E-3	(5/2)E-2	70
42	4.2	10	5E-3	(1/36)E-3	80
43	4.3	5	1E-2	1E-4	90
44	4.4	10	5E-3	(1/2)E-4	100
45	4.5	5	2E-2	(1/9)E-3	110
46	4.6	5	5E-3	(5/2)E-2	120
47	4.7	10	5E-3	(1/36)E-3	130
48	4.8	5	1E-3	(3/2)E-2	140
49	4.9	10	15E-3	2E-2	150
50	4.10	5	8E-3	1E-3	160

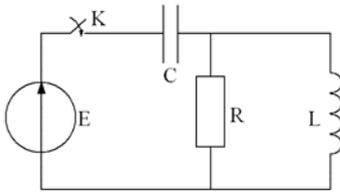


Рис. 4.1

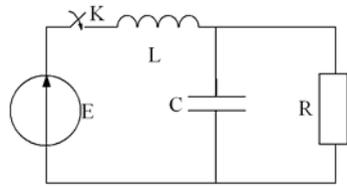


Рис. 4.2

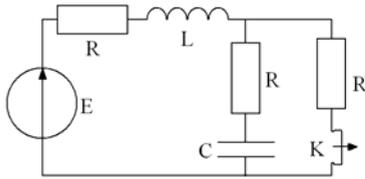


Рис. 4.3

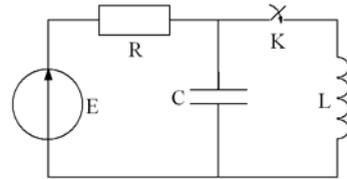


Рис. 4.4

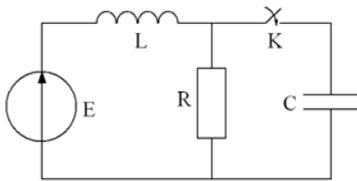


Рис. 4.5

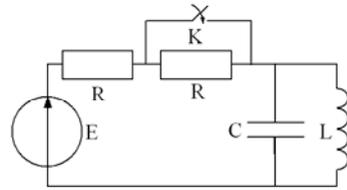


Рис. 4.6

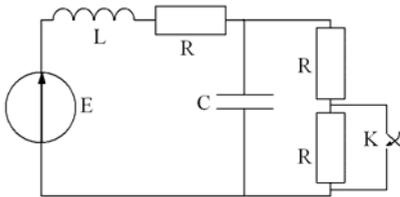


Рис. 4.7

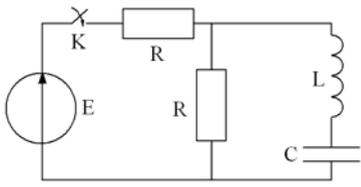


Рис. 4.8

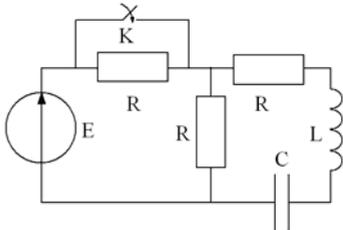


Рис. 4.9

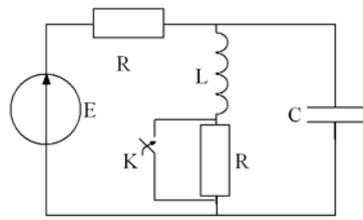


Рис. 4.10

## Задача

В электрической цепи (рис. 4.1)  $R_1=20 \text{ Ом}$ ,  $R=10 \text{ Ом}$ ,  $L=10 \text{ мГн}$ ,  $C=100 \text{ мкФ}$ ,  $U=90 \text{ В}$ .

Определить ток в индуктивности при переходном процессе двумя методами: классическим и операторным.

Построить график  $i_L(t)$ .

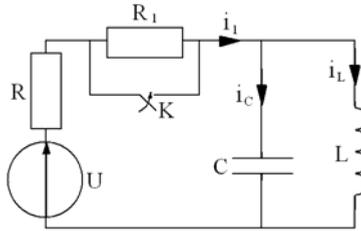


Рис. 4.1

### 1. Классический метод.

#### 1.1. Определим независимые начальные условия

$$i_L(0) = \frac{U}{R_1 + R} = \frac{90}{30} = 3 \text{ A}$$

$u_c(0)=0$ , так как сопротивление индуктивности постоянному току равно нулю.

#### 1.2. Определим величину принужденного тока для послекоммутационной цепи

$$i_{Lnp} = \frac{U}{R} = \frac{90}{10} = 9 \text{ A}$$

#### 1.3. Составим и решим характеристическое уравнение

$$Z_{\text{ex}}(p) = R + \frac{1}{Lp + \frac{1}{Cp}}; \quad Z_{\text{ex}}(p) = 0;$$

$$RLp + \frac{R}{Cp} + \frac{Lp}{Cp} = 0;$$

$$RLCp^2 + Lp + R = 0;$$

$$10 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-4} + 10^{-2} p + 10 = 0;$$

$$10^{-5} p^2 + 10^{-2} p + 10 = 0;$$

$$p = \frac{-10^{-2} \pm \sqrt{10^{-4} - 4 \cdot 10^{-4}}}{2 \cdot 10^{-5}} = \frac{-10^{-2} \pm j1,73 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 10^{-5}}$$

$$p_1 = -500 + j866; \quad p_2 = -500 - j866.$$

1.4. Корни характеристического уравнения комплексно сопряженные, следовательно функция свободного тока имеет вид:

$$i_{Lcs} = A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$\delta = 500; \quad \omega = 866.$$

Постоянными интегрирования в уравнении будут  $A$  и  $\varphi$ .

1.5. Составим систему уравнений для определения постоянных интегрирования

$$i_L = i_{Lnp} + i_{Lcs} = 9 + A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi);$$

$$\frac{di_L}{dt} = A \cdot \omega \cdot e^{-\delta t} \cdot \cos(\omega t + \varphi) - \delta \cdot A \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

1.6. Независимые начальные условия

$$i_L(0) = 3 A; \quad u_C(0) = 0; \quad \left( \frac{di_L}{dt} \right)_{t=0} = 0;$$

$$u_C(0) = L \left( \frac{di_L}{dt} \right)_{t=0}.$$

1.7. Решим систему (1.5.) для  $t=0$

$$\begin{cases} 3 = 9 + A \cdot \sin \varphi \\ 0 = A \cdot \omega \cdot \cos \varphi - \delta \cdot A \cdot \sin \varphi \end{cases};$$

$$\begin{cases} -6 = A \cdot \sin \varphi \\ 866A \cdot \cos \varphi = 500A \cdot \sin \varphi \end{cases};$$

$$\operatorname{tg} \varphi = \frac{866}{500} = 1,732, \varphi = 60^\circ$$

$$A = -\frac{6}{\sin \varphi} = -\frac{6}{0,866} = -6,928$$

1.7. Искомая величина тока

$$i_L = 9 - 6,928e^{-500t} \cdot \sin(866t + 60^\circ) \cdot A$$

2. *Операторный метод.*

2.1. Составим операторную схему цепи по известным независимым начальным условиям (рис. 4.2).

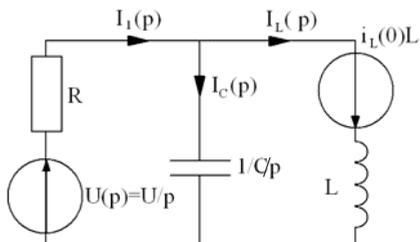


Рис. 4.2

2.2. Составим систему уравнений по законам Кирхгофа

$$\begin{cases} I_1(p) - I_C(p) - I_L(p) = 0 \\ I_1(p)R + I_C(p)\frac{1}{Cp} = \frac{U}{p} \\ -I_C(p)\frac{1}{Cp} + I_L(p) \cdot Lp = i_L(0) \cdot L \end{cases}$$

$$\begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R & \frac{1}{Cp} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{Cp} & Lp \end{vmatrix} x \begin{vmatrix} I_1(p) \\ I_C(p) \\ I_L(p) \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} 0 \\ \frac{U}{p} \\ i_L(0)L \end{vmatrix}$$

$$\Delta = \begin{vmatrix} 1 & -1 & -1 \\ R & \frac{1}{Cp} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{Cp} & Lp \end{vmatrix} = \frac{Lp}{Cp} + \frac{R}{Cp} + R \cdot Lp = \frac{RLCp^2 + Lp + R}{Cp}$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 1 & -1 & 0 \\ R & \frac{1}{Cp} & \frac{U}{p} \\ 0 & -\frac{1}{Cp} & i_L(0)L \end{vmatrix} = \frac{i_L(0)L}{Cp} + \frac{U}{Cp^2} + R \cdot i_L(0)L =$$

$$= \frac{i_L(0)Lp + RCi_L(0)Lp^2 + U}{Cp^2}$$

$$I_L(p) = \frac{RLCi_L(0)p^2 + Li_L(0)p + U}{p(RLCp^2 + Lp + R)} = \frac{N(p)}{M(p)}$$

2.4. Перейдем от изображения к оригиналу по теореме разложения

$$i_L(t) = \sum_{k=1}^3 \frac{N(p_k)}{M'(p_k)} \cdot e^{p_k t}$$

Корни

$$M(p) = p(RLCp^2 + Lp + R) : p_1 = 0; p_2 = -500 + j866; p_3 = -500 - j866$$

$$N(p) = 10 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-4} \cdot 3 \cdot p^2 + 3 \cdot 10^{-2} p + 90 = 3 \cdot 10^{-5} p^2 + 3 \cdot 10^{-2} p + 90$$

$$M'(p) = 3RLCp^2 + 2Lp + R = 3 \cdot 10^{-2} \cdot 10^{-4} p^2 + 2 \cdot 10^{-2} p + 10 = \\ = 3 \cdot 10^{-5} p^2 + 2 \cdot 10^{-2} p + 10$$

$$N(p_1) = 90; M'(p_1) = 10; \frac{N(p_1)}{M'(p_1)} = 9A$$

$$p_2^2 = (-500 + j866)^2 = 10^4 (25 - j86,6 - 75) = (-50 - j86,6) \cdot 10^4$$

$$p_3^2 = (-500 - j866)^2 = 10^4 (25 + j86,6 - 75) = (-50 + j86,6) \cdot 10^4$$

$$N(p_2) = 3 \cdot 10^{-5} \cdot (-50 - j86,6) \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^{-2} (-5 + j8,66) \cdot 10^2 + 90 = \\ = -15 - j26 - 15 + j26 + 90 = 60$$

$$N(p_3) = 3 \cdot 10^{-5} \cdot (-50 + j86,6) \cdot 10^4 + 3 \cdot 10^{-2} (-5 - j8,66) \cdot 10^2 + 90 = \\ = -15 + j26 - 15 - j26 + 90 = 60$$

$$M'(p_2) = 3 \cdot 10^{-5} (-50 - j86,6) \cdot 10^4 + 2 \cdot 10^{-2} (-5 + j8,66) \cdot 10^2 + 10 =$$

$$= -15 - j26 - 10 + j17,3 + 10 = -15 - j8,7 = -17,3e^{j30}$$

$$M'(p_2) = 3 \cdot 10^{-5} (-50 + j86,6) \cdot 10^4 + 2 \cdot 10^{-2} (-5 - j8,66) \cdot 10^2 + 10 =$$

$$= -15 + j26 - 10 - j17,3 + 10 = -15 + j8,7 = -17,3e^{-j30}$$

$$i_L(t) = \frac{N(p_1)}{M'(p_1)} \cdot e^0 + \frac{N(p_2)}{M'(p_2)} \cdot e^{p_2 t} + \frac{N(p_3)}{M'(p_3)} \cdot e^{p_3 t} =$$

$$= 9 + \frac{60}{-17,3e^{j30}} \cdot e^{-500t} \cdot e^{j866t} + \frac{60}{-17,3e^{-j30}} \cdot e^{-500t} \cdot e^{-j866t} =$$

$$= 9 - 3,46e^{-500t} \cdot (e^{j(866t-30)} + e^{-j(866t-30)}) =$$

$$= 9 - 3,46e^{-500t} \cdot 2 \cos(866t - 30^\circ) = 9 - 6,928 \cdot \sin(866t + 60^\circ) \quad A$$

## 5. РАСЧЕТ ЦЕПЕЙ НЕСИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА

### Расчетно-графическая работа №5

Для заданной электрической цепи с несинусоидальным периодическим воздействием (рис. 5.1 – 5.4) проделать следующее

1. Выполнить разложение сигнала воздействия в ряд Фурье. Ограничить число членов ряда 7 гармоникой включительно. При определении максимального воздействия  $A_m$  и циклической частоты следования сигнала  $\omega$  принять  $A_{m0} = 10$  (А или В),  $\omega_0 = 10^4$  рад/с.

2. Построить частотные спектры входного сигнала.

3. Для заданной электрической цепи определить значения параметров элементов, приняв  $L_0 = 10$  мГн,  $C_0 = 1$  мкФ,  $R_{H_0} = 100$  Ом.

4. Получить выражение для передаточной функции цепи, считая реакцией цепи – напряжение на нагрузке  $R_H$ . Рассчитать и построить соответствующие АЧХ и ФЧХ. Найти значения АЧХ и ФЧХ для частот, соответствующим частотам гармоник воздействия.

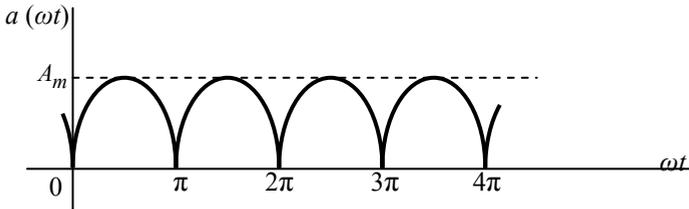
5. Определить реакцию цепи – напряжение и ток на нагрузке  $R_H$ . Записать их мгновенные значения. Построить частотные спектры реакции цепи.

6. Рассчитать действующие значения напряжения и тока в нагрузке.

7. Определить активную мощность в нагрузке.

Параметры элементов приведены в табл. 5.1

Воздействие  $a(\omega t)$ :



$$a(\omega t) = \frac{A_m}{\pi} + 2A_m \left( \frac{\sin \omega t}{4} - \frac{\cos 2\omega t}{3\pi} + \frac{\cos 4\omega t}{15\pi} - \frac{\cos 6\omega t}{105\pi} + \dots \right)$$

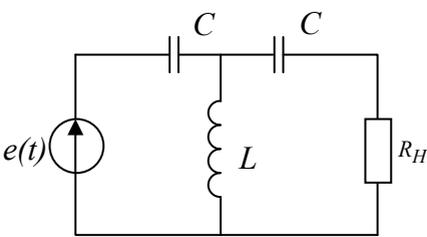


Рис. 5.1

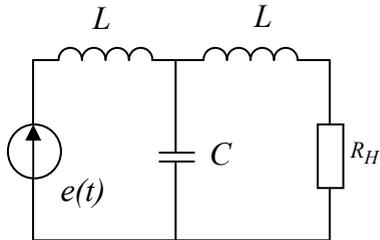


Рис. 5.2

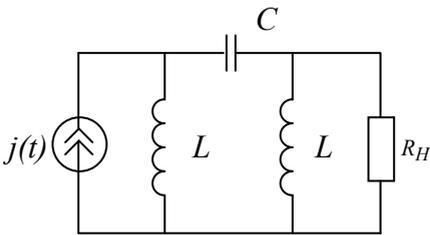


Рис. 5.3

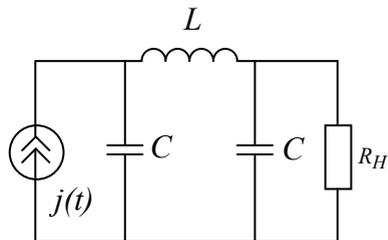


Рис. 5.4

Таблица 5.1

№ вар.	№ рис.	$\omega/\omega_0$	$A_m/A_{m_0}$	$L/L_0$	$C/C_0$	$R_H/R_{H_0}$
1	5.1	5	10	6	8	3
2	5.2	3	8	4	3	2
3	5.3	2	6	1	2	1
4	5.4	8	4	2	1	3
5	5.1	6	2	4	3	1
6	5.2	4	1	5	4	2
7	5.3	2	3	4	5	3
8	5.4	9	5	6	3	2
9	5.1	7	7	5	6	1
10	5.2	5	9	6	3	2
11	5.3	3	10	3	2	2
12	5.4	1	8	2	3	2
13	5.1	2	6	4	5	1
14	5.2	4	4	6	4	3
15	5.3	6	2	5	1	5
16	5.4	8	9	6	6	3
17	5.1	10	7	4	3	2
18	5.2	1	5	8	4	3
19	5.3	3	3	5	6	3
20	5.4	5	1	6	4	2
21	5.1	7	8	6	2	4
22	5.2	9	6	3	2	4
23	5.3	2	4	4	8	4
24	4	4	2	6	4	3
26	5.2	8	9	4	3	4
27	5.3	10	5	5	4	2
28	5.4	3	3	4	6	2
29	5.1	5	1	8	4	2
30	5.2	7	5	6	2	1

## 6. РАСЧЕТ МАГНИТНОГО ПОЛЯ ШИНОПРОВОДА

### Расчетно-графическая работа №6

По прямоугольному (в сечении) шинопроводу протекает постоянный ток  $I = 10n$  кА, где  $n$  – номер варианта.

Допустимая плотность тока  $\delta_{дон} = 2$  А/мм<sup>2</sup>. Сечение шинопровода  $2a \times 2b$ , где  $b/a = 10$ . Ток измеряется без разрыва токовой цепи косвенным методом, т.е. измеряется величина магнитного поля, по которой определяется значение тока, т.е. используется датчик напряженности магнитного поля, который располагается в соответствии с рис. 6.1 в точке  $K$ .

1. Выбрать для проектируемой системы сечение шинопровода.

2. Для подбора первичного преобразователя рассчитать значения напряженности магнитного поля в точке  $K$  ( $H_x$  и  $H_y$ ).

3. Определить "монтажную" составляющую относительной погрешности измерения магнитного поля при случайном смещении первичного преобразователя по оси  $y$  на  $\pm 1$  мм

( $\delta_y(\%) = \frac{H' - H}{H} \cdot 100$ ) и аналогично – по оси  $x$  ( $\delta_x(\%)$ ).

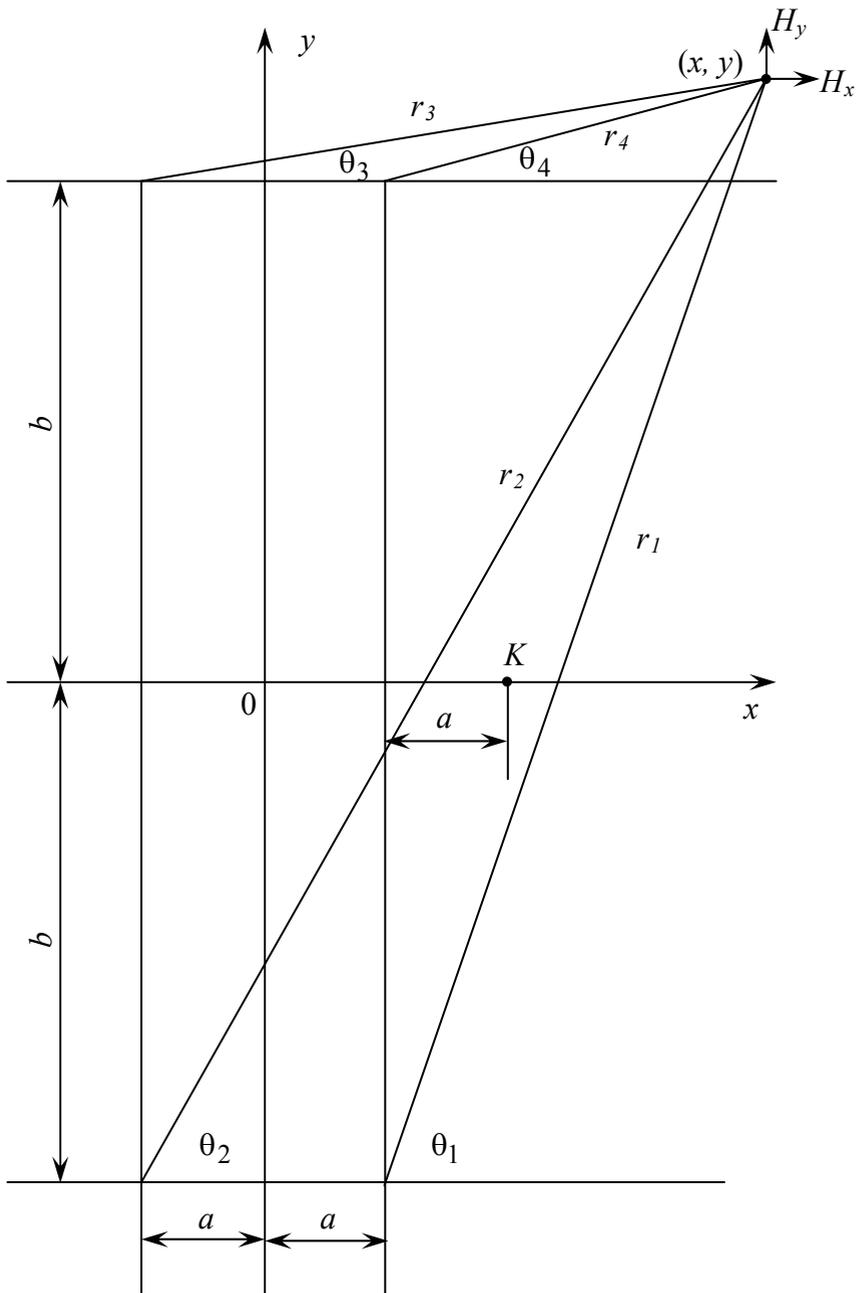


Рис. 6.1

## 7. РАСЧЕТ СХЕМ С ОПЕРАЦИОННЫМИ УСИЛИТЕЛЯМИ

### Расчетно-графическая работа №7

1. Построить схему сложения – вычитания на операционном усилителе (ОУ)

2. Построить схему компаратора на ОУ по заданным напряжениям срабатывания и отпускания.

Формула алгебраического сложения входных напряжений:

$$U_{\text{вых}} = AU_1 + BU_2 + CU_3 + DU_4$$

Напряжения срабатывания и отпускания компаратора соответственно  $U_{\text{ср}}$  и  $U_{\text{от}}$ .

Максимальное выходное напряжение ОУ:  $U_{\text{вых max}} = 10\text{В}$

Напряжение питания ОУ:  $\pm U_n$ .

Суммарное сопротивление, включенное между входами ОУ и общей шиной:  $R_{\text{кор}} = 5,1\text{кОм}$ .

Напряжение смещения задать положительным или отрицательным (в зависимости от варианта) напряжением питания ОУ (табл. 7.1).

Таблица 7.1

№ вар.	A	B	C	D	$U_{\text{ср}},$ В	$U_{\text{от}},$ В	$U_n,$ В	Способ задания смещения
<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>
1	1	-2	3	-4	2,5	2,0	12	+ $U_n$
2	2	-3	4	5	2,6	2,1	12	- $U_n$
3	-3	4	-5	6	2,7	2,2	12	+ $U_n$
4	4	5	-6	7	2,8	2,3	12	- $U_n$
5	5	-6	7	8	2,9	2,4	12	+ $U_n$
6	6	7	-8	9	3,0	2,5	12	- $U_n$
7	-4	3	2	1	3,1	2,6	12	+ $U_n$
8	5	4	-3	-2	3,2	2,7	12	- $U_n$
9	6	-5	4	3	3,3	2,8	12	+ $U_n$
10	7	6	-5	4	3,4	2,9	12	- $U_n$
11	8	-7	6	-5	3,5	3,0	12	+ $U_n$
12	-9	-8	7	6	3,6	3,1	12	- $U_n$
13	1	-2	1	2	3,7	3,2	12	+ $U_n$
14	1	2	1	-3	3,8	3,3	12	- $U_n$

Продолжение табл. 7.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
15	1	-2	-1	4	3,9	3,4	12	+U <sub>n</sub>
16	-1	2	1	5	2,5	2,0	12	-U <sub>n</sub>
17	1	2	-1	-6	2,6	2,1	13	+U <sub>n</sub>
18	-2	3	2	2	2,7	2,2	13	-U <sub>n</sub>
19	2	-3	-2	3	2,8	2,3	13	+U <sub>n</sub>
20	-2	3	-2	4	2,9	2,4	13	-U <sub>n</sub>
21	2	3	2	-5	3,0	2,5	13	+U <sub>n</sub>
22	2	-3	2	6	3,1	2,6	13	-U <sub>n</sub>
23	-2	3	2	7	3,2	2,7	13	+U <sub>n</sub>
24	4	5	-6	1	3,3	2,8	13	-U <sub>n</sub>
25	6	-5	4	-1	3,4	2,9	13	+U <sub>n</sub>
26	-2	-4	3	1	3,5	3,0	13	-U <sub>n</sub>
27	3	-8	1	2	3,6	3,1	13	+U <sub>n</sub>
28	2	8	-5	1	3,7	3,2	13	-U <sub>n</sub>
29	1	-6	2	8	3,8	3,3	13	+U <sub>n</sub>
30	-1	9	7	-7	3,9	3,4	13	-U <sub>n</sub>
31	2	8	-6	5	2,5	2,0	14	+U <sub>n</sub>
32	3	-9	8	2	2,6	2,1	14	-U <sub>n</sub>
33	1	-9	4	-5	2,7	2,2	14	+U <sub>n</sub>
34	2	3	-8	5	2,8	2,3	14	-U <sub>n</sub>
35	-7	2	-8	9	2,9	2,4	14	+U <sub>n</sub>
36	9	-6	5	1	3,0	2,5	14	-U <sub>n</sub>
37	3	9	-8	2	3,1	2,6	14	+U <sub>n</sub>
38	-8	6	-5	9	3,2	2,7	14	-U <sub>n</sub>
39	9	-7	5	-1	3,3	2,8	14	+U <sub>n</sub>
40	-8	1	2	-9	3,4	2,9	14	-U <sub>n</sub>
41	3	-1	2	-5	3,5	3,0	14	+U <sub>n</sub>
42	9	1	-3	5	3,6	3,1	14	-U <sub>n</sub>
43	-3	8	-2	5	3,7	3,2	14	+U <sub>n</sub>
44	9	-2	6	-4	3,8	3,3	14	-U <sub>n</sub>
45	-7	5	-2	9	3,9	3,4	14	+U <sub>n</sub>
46	9	-2	5	-7	2,5	2,0	14	-U <sub>n</sub>
47	3	-9	8	1	2,6	2,1	15	+U <sub>n</sub>
48	5	6	-2	3	2,7	2,2	15	-U <sub>n</sub>
49	-6	5	3	2	2,8	2,3	15	+U <sub>n</sub>
50	7	5	-3	4	2,9	2,4	15	-U <sub>n</sub>

№ вар.	A	B	C	D	U <sub>ср</sub> , В	U <sub>от</sub> , В	U <sub>п</sub> , В	Способ задания смещения
51	8	-9	-5	3	3,0	2,5	15	+U <sub>п</sub>
52	-3	5	9	2	3,1	2,6	15	-U <sub>п</sub>
53	9	8	-7	2	3,2	2,7	15	+U <sub>п</sub>
54	9	-7	6	2	3,3	2,8	15	-U <sub>п</sub>
55	1	8	-1	2	3,4	2,9	15	+U <sub>п</sub>
56	3	-8	3	8	3,5	3,0	15	-U <sub>п</sub>
57	2	9	-3	9	3,6	3,1	15	+U <sub>п</sub>
58	-9	2	-9	3	3,7	3,2	15	-U <sub>п</sub>
59	7	-5	6	-5	3,8	3,3	15	+U <sub>п</sub>
60	-6	1	-8	2	3,9	3,4	15	-U <sub>п</sub>

### Пример выполнения задания

1. Разработать схему усилителя, реализующую на выходе выражение вида:

$$U_{\text{вых}} = 10U_1 + U_2 - 4U_3 - 2U_4$$

#### Решение

В схеме, реализующей приведенное выражение, сигналы  $U_1$  и  $U_2$  должны подаваться на не инвертирующие входы, а  $U_3$  и  $U_4$  на инвертирующие входы усилителя. Схема, реализующая заданное выражение, приведена на рис. 7.1.

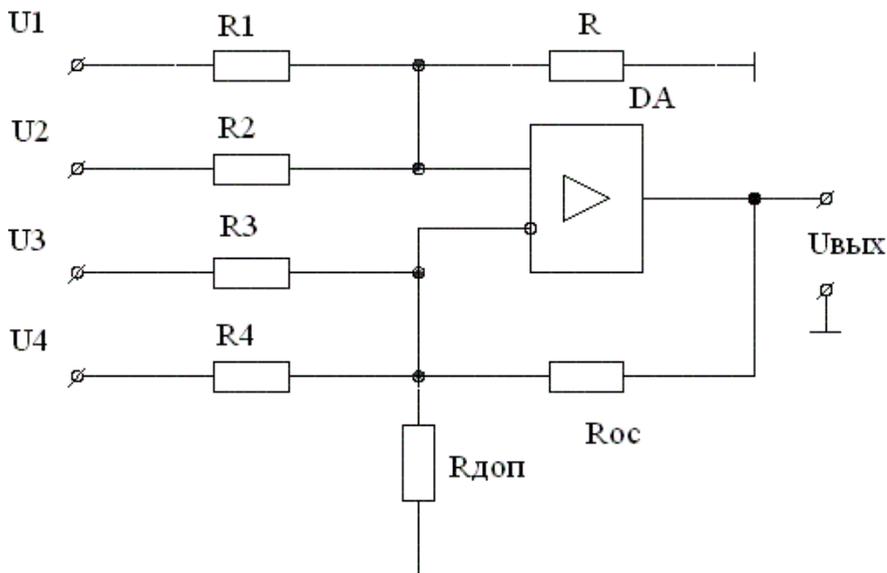


Рис. 7.1 Схема сложения – вычитания.

Допустим, что сопротивление  $R_{oc} = R' = 100 \text{ кОм}$ , тогда

$$\frac{R'}{R_1} = 10, \text{ откуда } R_1 = 10 \text{ кОм}$$

$$\frac{R'}{R_2} = 1, \text{ откуда } R_2 = 100 \text{ кОм}$$

$$\frac{R_{oc}}{R_3} = 4, \text{ откуда } R_3 = 25 \text{ кОм}$$

$$\frac{R_{oc}}{R_4} = 2, \text{ откуда } R_4 = 50 \text{ кОм}$$

Проверим условие равенства коэффициентов усиления по не инвертирующему и инвертирующему входам:

$$K_H = \frac{R_{oc}}{R_1} + \frac{R_{oc}}{R_2} = 11,$$

$$K_H = \frac{R'}{R_3} + \frac{R'}{R_4} = 6$$

Проверка показала, что  $K_u < K_n$ . Следовательно, для обеспечения работоспособности схемы ее необходимо сбалансировать.

Определим разность коэффициентов усиления по входам схемы:

$$K_n - K_u = 5,$$

Следовательно, по инвертирующему входу необходимо добавить цепь, обеспечивающую дополнительный коэффициент передачи, равный 5. Тогда

$$\frac{R_{oc}}{R_{доп}} = 5 \quad \text{и} \quad R_{доп} = 20 \text{ кОм}$$

После введения между инвертирующим входом и общей шиной дополнительного резистора  $R_{доп}$  условие баланса будет выполнено и выходное напряжение усилителя будет определяться заданным выражением. При выборе сопротивлений из стандартного ряда Е-24 (25%) необходимо учесть, что ближайшими значениями будут  $R_3 = 24 \text{ кОм}$ ;  $R_4 = 51 \text{ кОм}$ . Остальные сопротивления не расходятся с рядом.

**2.** Разработать схему гистерезисного компаратора с порогами срабатывания и отпускания, равными соответственно  $U_{cp} = 2,4 \text{ В}$  и  $U_{от} = 1,9 \text{ В}$ .

Максимальное выходное напряжение ОУ  $U_{вых,max} = 10 \text{ В}$ ;  $U_n = \pm 12 \text{ В}$ . Суммарное сопротивление, включенное между входами ОУ и общей шиной,  $R_{кор} = 5,1 \text{ кОм}$ .

### **Решение:**

**1)** Рассмотрим расчет гистерезисного компаратора при задании смещения положительным полюсом источника питания (рис 7.2).

Для такой схемы полярности напряжений  $U_{cp}$  и  $U_{om}$  должны совпадать с напряжением смещения  $U_{см}$ . Согласно условию:

$$U_{см} = \frac{U_{cp} + U_{om}}{2} = \frac{2,4 + 1,9}{2} = 2,15B$$

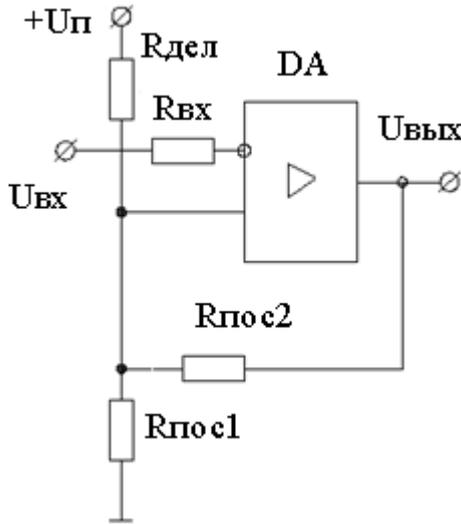


Рис. 7.2

Коэффициент передачи цепи положительной обратной связи (ПОС) определяется из условия

$$U_{cp} - U_{см} = |U_{вых max} / b_{ос},$$

откуда

$$b_{ос} = \frac{U_{cp} - U_{см}}{|U_{вых max}|} = \frac{2,4 - 2,15}{10} = 0,025$$

Напряжение смещения  $U_{см}$  задается подключением дополнительного делителя напряжения, подсоединенного к положительному полюсу питания ОУ.

$$U_{см} = \frac{U_n (R_{noc2} \parallel R_{noc1})}{R_{дел} + (R_{noc2} \parallel R_{noc1})}$$

Для определения сопротивлений резисторов схемы дополним полученное выражение для  $U_{см}$  двумя другими уравнениями, полученными из условий обеспечения заданного значения  $b_{oc}$  и минимизации погрешности работы ОУ, обусловленной его не идеальностью, т. е.

$$b_{oc} = \frac{R_{noc1} \parallel R_{дел}}{R_{noc2} + (R_{noc1} \parallel R_{дел})};$$

$$R_{ex} = R_{кор} = (R_{noc1} \parallel R_{noc2} \parallel R_{дел})$$

Решая полученную систему уравнений для  $U_{см}$ ,  $b_{oc}$  и  $R_{кор}$ , найдем:

$$U_{см} = \frac{U_n R_{кор}}{R_{дел}};$$

$$b_{oc} = \frac{R_{кор}}{R_{noc2}}.$$

Тогда

$$R_{дел} = \left( \frac{U_n}{U_{см}} \right) R_{кор} = \left( \frac{12}{2,15} \right) \cdot 5,1 = 28,46 \text{ кОм}$$

Выбираем  $R_{дел} = 27 \text{ кОм}$ .

$$R_{noc2} = \frac{R_{кор}}{b_{oc}} = \frac{5,1}{0,025} = 204 \text{ кОм};$$

$$R_{noc1} = \frac{1}{\frac{1}{R_{кор}} - \frac{1}{R_{noc2}} - \frac{1}{R_{дел}}} = \frac{1}{\frac{1}{5,1} - \frac{1}{27} - \frac{1}{200}} = 6,49 \text{ кОм}$$

Принимаем  $R_{noc2} = 200 \text{ кОм}$ ;  $R_{noc1} = 6,8 \text{ кОм}$ .

Проверим полученные напряжения срабатывания и отпускания. Записывая для неинвертирующего входа ОУ уравнение по первому закону Кирхгофа, найдем

$$U_{вхн} = \frac{\frac{U_n}{R_{дел}} + \frac{U_{вых\ max}}{R_{noc2}}}{\frac{1}{R_{noc1}} + \frac{1}{R_{noc2}} + \frac{1}{R_{дел}}},$$

отсюда

$$U_{ср} = \frac{\frac{U_n}{R_{дел}} + \frac{U_{вых\ max}}{R_{noc2}}}{\frac{1}{R_{noc1}} + \frac{1}{R_{noc2}} + \frac{1}{R_{дел}}} = \frac{\frac{12}{27} + \frac{10}{200}}{\frac{1}{27} + \frac{1}{6,8} + \frac{1}{200}} = 2,61В;$$

$$U_{от} = \frac{\frac{U_n}{R_{дел}} - \frac{U_{вых\ max}}{R_{noc2}}}{\frac{1}{R_{noc1}} + \frac{1}{R_{noc2}} + \frac{1}{R_{дел}}} = \frac{\frac{12}{27} - \frac{10}{200}}{\frac{1}{27} + \frac{1}{6,8} + \frac{1}{200}} = 2,086В.$$

Несовпадение заданных и определенных в результате расчета напряжений  $U_{ср}$  и  $U_{от}$  объясняется округлением полученных сопротивлений резисторов схемы до ближайших стандартных значений.

- 2) В качестве источника смещения можно использовать отрицательное напряжение источника питания ОУ (рис. 7.3).

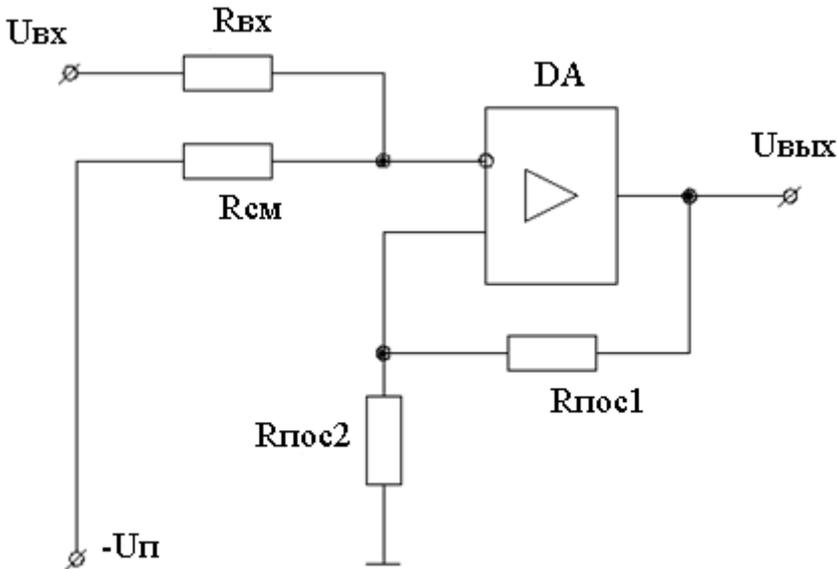


Рис. 7.3 Гистерезисная схема сравнения при задании смещения отрицательным полюсом источника питания

Для полученной таким образом схемы можно записать следующую систему уравнений:

$$\frac{U_{cp}}{R_{вх}} - \frac{U_n}{R_{см}} = b_{oc} \frac{U_{вых\ max}}{R_{\Sigma}};$$

$$\frac{U_{om}}{R_{вх}} - \frac{U_n}{R_{см}} = b_{oc} \frac{-U_{вых\ max}}{R_{\Sigma}};$$

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_{вх}} + \frac{1}{R_{см}};$$

$$b_{oc} = \frac{R_{noc\ 2}}{(R_{noc\ 2} + R_{noc\ 1})};$$

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_{noc\ 1}} + \frac{1}{R_{noc\ 2}}.$$

Решим эту систему в предположении, что как и для схемы на рис. 7.2 сопротивление  $R_{\Sigma} = R_{кор} = 5,1 \text{ кОм}$

$$\frac{1}{R_{\text{вх}}} = \frac{1}{R_{\Sigma}} - \frac{1}{R_{\text{см}}};$$

$$U_{\text{cp}} \left( \frac{1}{R_{\Sigma}} - \frac{1}{R_{\text{см}}} \right) - \frac{U_n}{R_{\text{см}}} = b_{\text{oc}} \frac{U_{\text{вых max}}}{R_{\Sigma}};$$

$$U_{\text{om}} \left( \frac{1}{R_{\Sigma}} - \frac{1}{R_{\text{см}}} \right) - \frac{U_n}{R_{\text{см}}} = b_{\text{oc}} \frac{(-U_{\text{вых max}})}{R_{\Sigma}}.$$

Складывая два последних уравнения, получим:

$$\frac{U_{\text{cp}} + U_{\text{om}}}{R_{\Sigma}} - \frac{1}{R_{\text{см}}} (U_{\text{cp}} + U_{\text{om}} + 2U_n) = 0,$$

или

$$R_{\text{см}} = \frac{U_{\text{cp}} + U_{\text{om}} + 2U_n}{U_{\text{cp}} + U_{\text{om}}} R_{\Sigma} = \frac{2,4 + 1,9 + 2 \cdot 12}{2,4 + 1,9} \cdot 5,1 = 33,56 \text{ кОм}$$

Выбираем  $R_{\text{см}} = 33 \text{ кОм}$ .

$$R_{\text{вх}} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\Sigma}} - \frac{1}{R_{\text{см}}}} = \frac{1}{\frac{1}{5,1} - \frac{1}{33}} = 6,03 \text{ кОм}$$

Принимаем  $R_{\text{вх}} = 6,2 \text{ кОм}$ .

Уточним после выбора номиналов резисторов  $R_{\text{вх}}$  и  $R_{\text{дел}}$  значение

$$R_{\Sigma} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{вх}}} + \frac{1}{R_{\text{см}}}} = \frac{1}{\frac{1}{6,2} + \frac{1}{33}} = 5,22 \text{ кОм}.$$

Тогда

$$b_{oc} = \left( \frac{U_{cp}}{R_{вх}} - \frac{U_n}{R_{см}} \right) \frac{R_{\Sigma}}{U_{вых\max}} = \left( \frac{2,4}{6,2} - \frac{12}{33} \right) \frac{5,22}{10} = 0,0122.$$

Из выражения для  $b_{oc}$  находим

$$b_{oc} = \frac{1}{1 + \frac{R_{noc1}}{R_{noc2}}} \quad \text{или} \quad R_{noc2} \left( \frac{1}{b_{oc}} - 1 \right) = R_{noc1}.$$

Тогда

$$\frac{1}{R_{\Sigma}} = \frac{1}{R_{noc1}} + \frac{1}{R_{noc2}} = \frac{1}{R_{noc2}} \left( \frac{1}{\frac{1}{b_{oc}} - 1} + 1 \right),$$

откуда

$$R_{noc2} = R_{\Sigma} \left( 1 + \frac{1}{\frac{1}{b_{oc}} - 1} \right) = 5,22 \left( 1 + \frac{1}{\frac{1}{0,0122} - 1} \right) = 5,28 \text{ кОм}.$$

Принимаем  $R_{noc2} = 5,1 \text{ кОм}$ ;  $R_{noc1} = 5,1(1/0,0122 - 1) = 412,9 \text{ кОм}$ .

Принимаем  $R_{noc1} = 430 \text{ кОм}$ .

Проверяем полученные значения порогов срабатывания и отпущения рассчитанной схемы.

$$b_{oc} = \frac{5,1}{5,1 + 430} = 0,01172;$$

$$U_{cp} = \left( b_{oc} \frac{U_{вых\max}}{R_{\Sigma}} + \frac{U_n}{R_{см}} \right) R_{вх} = \left( 0,01172 \frac{10}{5,22} + \frac{12}{33} \right) \cdot 6,2 = 2,39 \text{ В};$$

$$U_{от} = 2,11 \text{ В}.$$

Полученное расхождение расчетных и заданных напряжений  $U_{cp}$  и  $U_{om}$  (как в предыдущем случае) определяется путем округления сопротивлений резисторов до стандартных значений ряда.

Таблица 7.2

Индекс рядов	Числовые коэффициенты, умножаемые на любое число, кратное 10	Допускаемое отклонение сопротивления от номинального, %
E <sub>6</sub>	1.0 1.5 2.2 3.3 4.7 6.8	±20
E <sub>12</sub>	1.0 1.5 2.2 3.3 4.7 6.8	±10
	1.2 1.8 2.7 3.9 5.6 8.2	±10
E <sub>24</sub>	1.0 1.5 2.2 3.3 4.7 6.8	±5
	1.1 1.6 2.4 3.6 5.1 7.5	±5
	1.2 1.8 2.7 3.9 5.6 8.2	±5
	1.3 2.0 3.0 4.3 6.2 9.1	±5

## 8. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛЯ

### Расчетно-графическая работа №8

По заданному для данного варианта режиму нагрузки производственного механизма (табл. 8.1) построить нагрузочную диаграмму  $P(t)$  и выбрать по табл. 8.2 мощность асинхронного короткозамкнутого двигателя.

Для выбранного двигателя необходимо определить:

- потребляемую мощность;
- синхронную и номинальную скорости вращения;
- номинальный и максимальный моменты;
- критическое скольжение;

По полученным данным построить зависимость момента от скольжения и механическую характеристику двигателя.

Таблица 8.1

№ вариан- та	Интервалы времени, с					Мощность нагрузки, кВт				
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
1	18	30	11	20	23.5	8	5	0	25	10
2	19	31	10	19	24	7	5	0	26	10
3	18	30	10	20	23	8	6	1	15	11
4	17	29	15	21	22	9	4	2	18	9
5	60	100	10	45	30	8	4	15	10	25
6	61	99	11	46	29	8	4	15	10	25
7	60	100	10	45	30	7	5	16	9	26
8	59	101	9	44	31	9	4	15	10	25
9	30	15	60	60	10	25	10	0	18	30
10	50	20	40	50	25	0	4	8	0	55
11	15	25	20	35	30	15	4	30	15	10
12	10	75	60	50	10	30	50	0	15	25
13	7	3	15	4	12	6	20	3	15	30
14	1	1.5	2.5	1.5	1.5	8	6	0	4	3.5
15	1.5	4	2.5	3.5	3	20	10	6	8	8
16	20	10	50	10	15	20	10	6	8	8
17	18	30	10	20	23.5	8	6	0	4	3.5
18	60	100	10	45	3	8	4	15	10	25
19	30	15	60	60	10	6	20	13	15	30
20	30	20	40	50	45	30	5	0	15	25
21	15	25	10	35	30	8	6	0	4	3.5
22	10	75	60	50	10	15	4	30	15	10
23	7	3	15	4	20	0	4	8	0	5
24	1	1.5	2.5	1.5	1.5	10	10	0	18	30
25	1	4	2.5	3.5	3	8	4	15	10	25
26	20	10	50	10	15	8	6	0	4	3.5
27	18	30	10	20	23.5	20	10	6	8	8
28	60	100	10	45	30	26	20	13	15	30
29	30	15	60	60	10	30	5	0	15	25
30	50	20	40	50	45	15	4	30	15	10
31	15	25	10	35	30	0	4	8	0	5
32	7	4	15	4	13	5	20	4	14	30
33	1	2	2	3	2	8	6	0	4	3.5
34	10	74	61	50	10	31	51	0	14	24

Окончание табл. 8.1

№ вариан- та	Интервалы времени, с					Мощность нагрузки, кВт				
	t <sub>1</sub>	t <sub>2</sub>	t <sub>3</sub>	t <sub>4</sub>	t <sub>5</sub>	P <sub>1</sub>	P <sub>2</sub>	P <sub>3</sub>	P <sub>4</sub>	P <sub>5</sub>
35	19	11	49	11	15	20	10	6	8	8
36	14	24	10	35	30	8	7	0	4	4
37	2	1.5	2	3	1	10	10	0	19	29
38	16	30	9	20	24	7	6	0	25	10
39	17	29	8	21	25	8	6	0	26	9
40	1	3	2	3	4	7	7	7	0	1
41	2	4	5	6	7	3	4	5	6	2
42	3	2	1	2	10	1	2	4	5	6
43	1	2	3	4	5	2	3	2	1	0
44	18	29	12	19	24	8	5	0	25	10
45	19	28	11	18	25	7	6	0	24	9
46	10	74	61	49	11	30	50	0	15	25
47	58	100	8	43	30	9	4	15	10	25
48	29	14	59	59	10	25	10	0	18	30
49	49	19	39	49	24	0	4	8	0	5
50	14	24	19	34	30	15	4	30	15	10
51	59	99	9	44	29	8	4	15	10	25
52	29	16	60	66	10	25	9	0	17	30
53	2	3	2	1	1	0	4	8	0	5
54	6	4	2	3	1	0	0	3	3	3
55	20	30	40	50	60	1	2	3	0	0
56	15	20	16	30	41	1	0	2	3	0
57	1	1	2	3	1	1	2	3	4	5
58	16	16	25	23	24	0.5	2.5	0	3.5	0
59	14	13	12	10	12	0	2	3	4	0
60	15	12	11	9	13	1	3	2	3	0

Таблица 8.2

$P_H$ , кВт	$U_H$ , В	$S_H$ , %	$\eta_H$	$\cos\varphi_H$	$p$	$m_{max}$	$m_n$	$i_n$
0,8	220	3,0	0,78	0,86	1	2,2	1,9	7
1,0	220	3,0	0,79	0,87	1	2,2	1,9	7
1,5	220	4,0	0,81	0,88	1	2,2	1,8	7
2,2	220	4,5	0,83	0,89	1	2,2	1,8	7
3,0	220	3,5	0,85	0,89	1	2,2	1,7	7
4,0	220	2,0	0,86	0,89	1	2,2	1,7	7
5,5	220	3,0	0,86	0,89	1	2,2	1,7	7
7,5	220	3,5	0,87	0,89	1	2,2	1,6	7
10,0	220	4,0	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7
13	220	3,5	0,88	0,89	1	2,2	1,5	7
17	220	3,5	0,88	0,9	1	2,2	1,2	7
22	220	3,5	0,88	0,9	1	2,2	1,1	7
30	220	3,0	0,89	0,9	1	2,2	1,1	7
40	220	3,0	0,89	0,91	1	2,2	1,0	7
55	220	3,0	0,9	0,92	1	2,2	1,0	7
75	220	3,0	0,9	0,92	1	2,2	1,0	7
100	220	2,5	0,91	0,92	1	2,2	1,0	7

## Порядок выполнения задания

1. По данным табл. 1 строят нагрузочную диаграмму (рис.8.1)

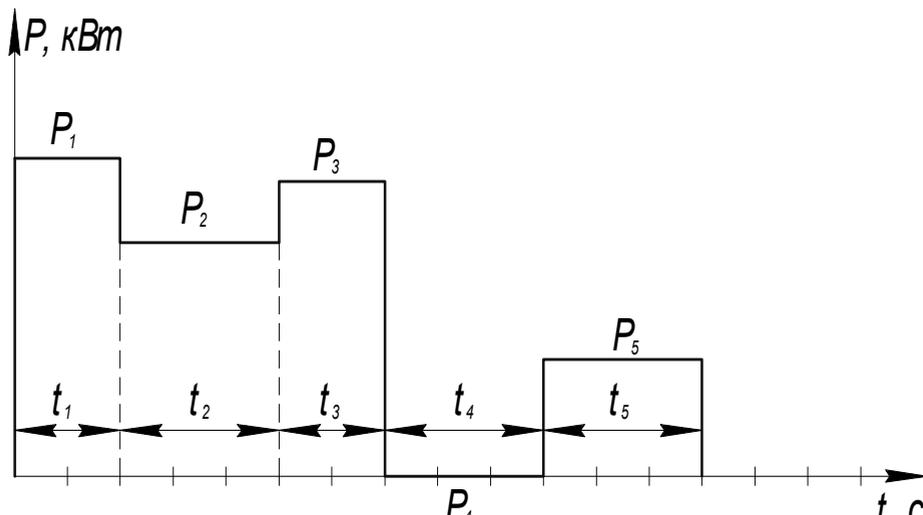


Рис. 8.1 Нагрузочная диаграмма

2. Определяют эквивалентную мощность, кВт

$$P_{\text{экв}} = \sqrt{\frac{P_1 t_1 + P_2^2 t_2 + P_3^2 t_3 + P_4^2 t_4 + P_5^2 t_5}{t_1 + t_2 + t_3 + t_4 + t_5}}$$

3. Выбирают двигатель по табл. 8.2, у которого номинальная мощность  $P_n > P_{\text{экв}}$ .

4. Расчет параметров.

- 4.1 Потребляемая мощность, кВт:

$$P_{1n} = \frac{P_n}{\eta_n}.$$

- 4.2. Синхронная скорость вращения, об/мин:

$$n_0 = \frac{3000}{p}.$$

4.3. Номинальная скорость вращения вала, об/мин:

$$n_n = n_0 - \frac{S_n \cdot n_0}{100\%}.$$

4.4. Номинальный момент двигателя, Н·м:

$$M_n = \frac{9550 P_n}{n_n}; \quad P_n \text{ [кВт]}, \quad n_n \text{ [об/мин]}$$

4.5. Максимальный момент на валу двигателя, Н·м:

$$M_{max} = M_n m_{max}.$$

4.6. Номинальный ток двигателя, А:

$$I_n = \frac{P_{1n}}{\sqrt{3} U_n \cos \varphi_n}; \quad P_{1n} \text{ [Вт]}$$

4.7. Пусковой ток, А:

$$I_{п} = I_n i_{п}$$

4.8. Критическое скольжение, %

$$S_{кр} = S_n \left( m_{max} + \sqrt{m_{max}^2 - 1} \right)$$

5. Построение зависимости  $M(S)$  (рис. 8.2):

$$M(S) = \frac{2M_{max}}{\frac{S}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{S}}; \quad S \in [0; 100\%]$$

1. Построение механической характеристики  $n(M)$  (рис. 8.3).

Используя выше принятые значения  $S$ , определить значения  $n$  по выражению

$$n = n_0 - \frac{S \cdot n_0}{100\%}, \text{ об/мин}$$

Построить зависимость  $n(M)$

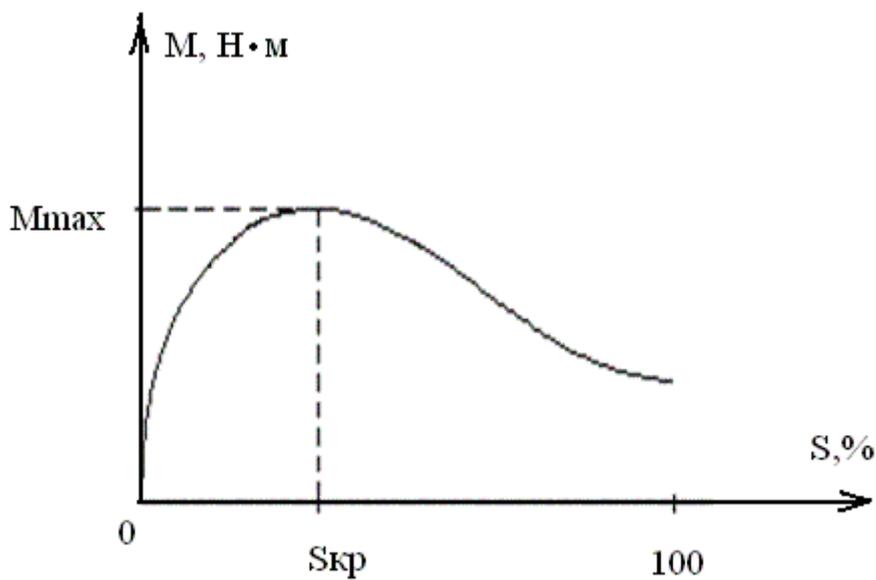


Рис. 8.2 Зависимость момента от скольжения

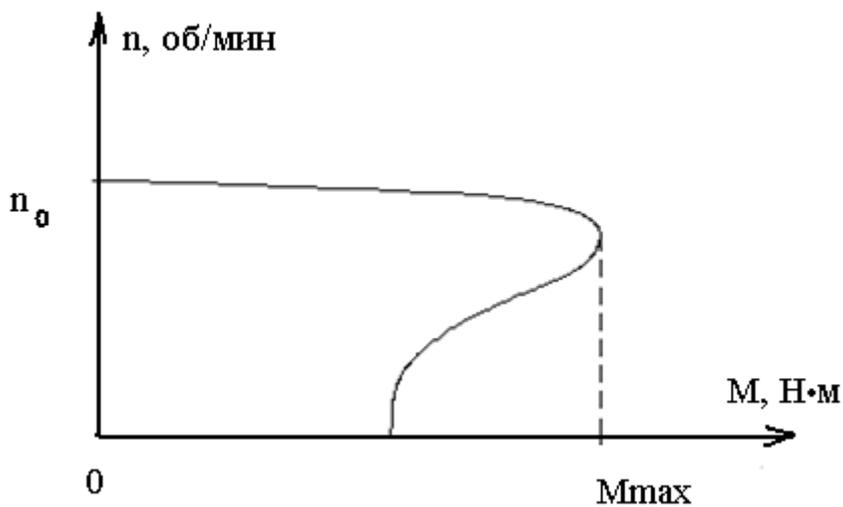


Рис. 8.3 Механическая характеристика двигателя

## Библиографический список:

1. Компьютерное моделирование линейных электрических цепей: уч. пособие / Ю.А. Мелешкин, П.П. Гавриш, Ф.В. Дремов, О.В. Лысенко,. – Самара: Самар. гос. техн. ун-т, 2009. – 76 с.
2. Теоретические основы электротехники: В 3-х т. Учебник для вузов. Том 1,2 / К.С. Демирчан, Л.Р. Нейман, Н.В. Коровкин, В.Л. Чечурин. – СПб.; Питер, 2004. – 463 с.: ил.
3. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники. Электрические цепи: Учеб. – 10-е изд. – М.: Гардарика, 2002. – 636 с.
4. Евсеев М.Е. Теоретические основы электротехники: Учебное пособие.-СПб.:Политехника, 2008, -380с.

## Оглавление

1. Анализ линейных электрических цепей постоянного тока.....	5
2. Анализ линейных электрических цепей однофазного синусои- дального тока.....	20
3. Линейные электрические цепи трехфазного синусоидального тока.....	36
4. Переходные процессы в линейных электрических цепях.....	44
5. Расчет цепей несинусоидального тока.....	53
6. Расчет магнитного поля шинпровода.....	56
7. Расчет схем с операционными усилителями.....	58
8. Расчет характеристик электродвигателя.....	69
Библиографический список.....	76



## **Электротехника и электроника. Расчетно-графические работы**

Составители: МЕЛЕШКИН Юрий Александрович  
АНДРЕЕВ Иван Александрович  
СНАДЧЕНКО Светлана Валерьевна

Подписано в печать  
Формат 60× 84 1/16  
Печать офсетная. Усл. п.л.  
Усл.кр. – отг. Уч.-изд.л.  
Заказ Тираж 50 экз. С.-76

---

Типография филиала СамГТУ в г.Сызрани  
446001 г.Сызрань, ул.Советская, 45

