

**621.3  
В 676**

Міністерство освіти і науки України  
Запорізька державна інженерна академія

---



**В. О. Волков**

## **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

**Методичні вказівки  
до виконання курсової роботи, розрахунково-графічних,  
контрольних та самостійних робіт**

*для студентів ЗДІА  
напряму 6.050602 "Гідроенергетика"  
денної та заочної форм навчання*

Міністерство освіти і науки України  
Запорізька державна інженерна академія

## **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

**Методичні вказівки  
до виконання курсової роботи, розрахунково-графічних,  
контрольних та самостійних робіт**

*для студентів ЗДІА  
напряму 6.050602 "Гідроенергетика"  
денної та заочної форм навчання*

*Рекомендовано до видання  
на засіданні кафедри ГЕ,  
протокол № 17 від 12.05.2015р.*

Запоріжжя  
ЗДІА  
2015

ББК 621.3  
В 676

*В. О. Волков, к.т.н., доцент*

*Відповідальний за випуск: заст. зав. кафедри ГЕ,  
д.т.н., професор О. В. Волков*

**Волков В. О.**

В 676 Теоретичні основи електротехніки: методичні вказівки до виконання курсової роботи, розрахунково-графічних, контрольних та самостійних робіт для студентів ЗДІА напрямку 6.050602 "Гідроенергетика" денної та заочної форм навчання / Волков В. О.; Запоріж. держ. інж. акад. – Запоріжжя: ЗДІА, 2015. – 52 с.

## ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	5
1.1 Розрахунок лінійних електричних ланцюгів постійного струму	5
1.2 Методика розрахунку лінійних електричних ланцюгів постійного струму	11
2 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ ОДНОФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ЗМІННОГО СТРУМУ	18
2.1 Розрахунок однофазних лінійних електричних схем змінного струму	18
2.2 Методика розрахунку однофазних лінійних електричних схем змінного струму	23
3 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ЗМІННОГО СТРУМУ	26
3.1 Розрахунок трифазних лінійних електричних схем змінного струму	26
3.2 Методика розрахунку трифазних електричних схем змінного струму	30
3.2.1 Методика розрахунку трифазної електричної схеми змінного струму при з'єднанні споживачів зіркою	30
3.2.2 Методика розрахунку трифазної електричної схеми змінного струму при з'єднанні споживачів трикутником	36
4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМАХ	40
4.1 Розрахунок перехідних процесів в електричних схемах	40
4.2 Методика дослідження перехідних процесів електричних схемах	41
4.2.1 Методика дослідження перехідних процесів в електричних схемах з індуктивністю	41
4.2.2 Методика дослідження перехідних процесів в електричних ланцюгах з конденсатором та опором	47
ДЖЕРЕЛА ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	54

## ВСТУП

Методичні вказівки до курсового роботи, розрахунково-графічних, контрольних та самостійних робіт, складаються з двох частин. Завдання першої частини складено по темі «Методи розрахунку лінійних електричних схем постійного струму». Завдання другої частини складено за темами: «Розрахунок однофазних лінійних електричних схем змінного струму», «Трифазні електричні схеми», «Перехідні процеси в електричних схемах».

# 1 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ЛАНЦЮГІВ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

## 1.1 Розрахунок лінійних електричних ланцюгів постійного струму

Для електричних ланцюгів (рис.1.1 – рис.1.30) виконати наступне:

- 1) скласти на основі законів Кірхгофа систему рівнянь для визначення струмів у всіх ланках схеми;
  - 2) визначити струми у всіх ланках схеми, використовуючи метод контурних струмів;
  - 3) скласти баланс потужностей для заданої схеми;
  - 4) результати розрахунків струмів зобразити у вигляді таблиці;
  - 5) Побудувати потенціальну діаграму для кожного контуру.
- Варіант завдання визначається з табл.1.1.

Таблиця 1.1

Числові значення параметрів схем електричних ланцюгів постійного струму

№ варіанту	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом
1	40	80	45	24	36	23	14	12
2	50	120	32	6	34	2	56	54
3	20	45	64	22	13	87	47	37
4	13	20	65	48	94	33	45	73
5	26	11	66	34	67	45	32	64
6	44	14	22	64	95	21	44	55
7	53	20	35	66	21	37	63	72
8	64	30	54	73	56	76	23	24
9	24	10	64	49	40	30	20	10
10	12	35	46	34	36	75	45	39

Продовження таблиці 1.1

№ варіанту	$E_1$ , В	$E_2$ , В	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$R_3$ , Ом	$R_4$ , Ом	$R_5$ , Ом	$R_6$ , Ом
11	100	45	14	23	32	45	34	65
12	150	70	76	56	42	74	43	46
13	36	90	73	26	15	76	82	92
14	75	30	95	90	23	53	56	73
15	65	80	36	37	16	67	34	75
16	22	50	57	73	17	33	36	37
17	5	8	23	6	16	57	37	34
18	80	15	32	34	17	77	34	46
19	95	14	5435	36	18	57	85	56
20	110	72	67	78	84	83	84	33
21	220	110	83	46	84	84	99	88
22	180	90	23	34	55	88	95	64
23	42	25	56	4	54	74	35	48
24	60	20	34	66	32	53	74	24
25	70	140	31	37	45	84	68	34
26	105	35	57	43	34	32	86	63
27	125	75	58	77	57	55	54	67
28	115	150	77	59	45	44	46	53
29	250	100	75	88	33	67	32	68
30	85	140	23	43	57	43	56	35

Варіанти схем електричних ланцюгів постійного струму

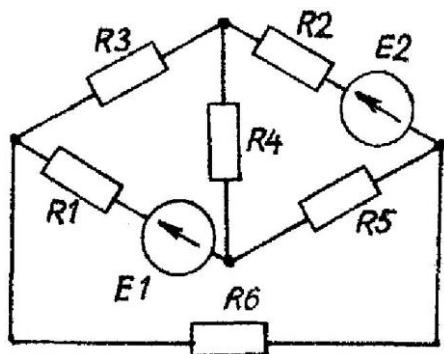


Рис.1.1

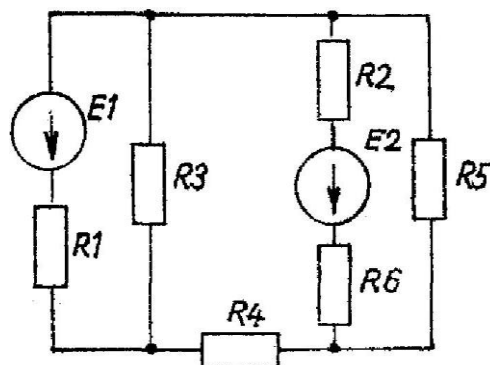


Рис.1.2

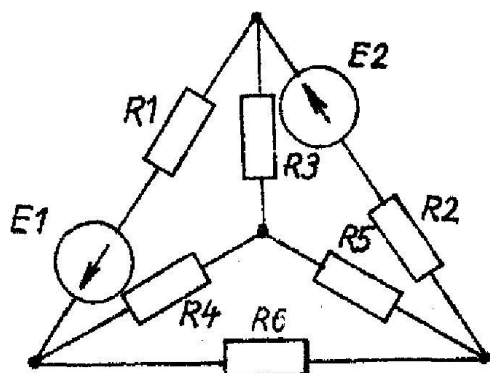


Рис.1.3

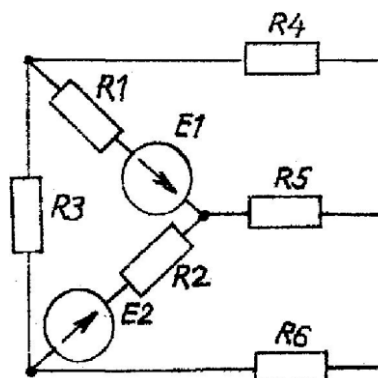


Рис.1.4

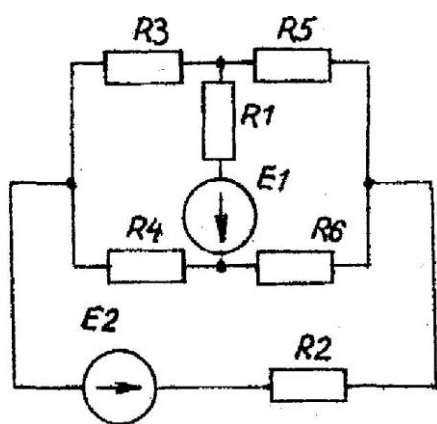


Рис.1.5

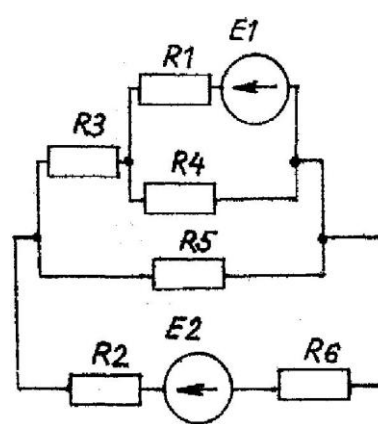


Рис.1.6

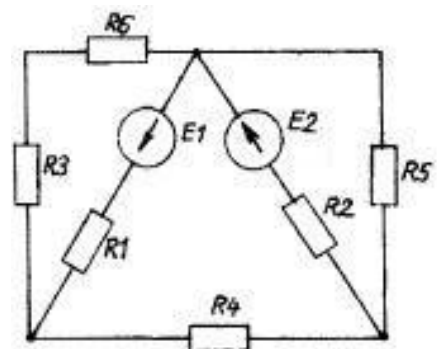


Рис.1.7

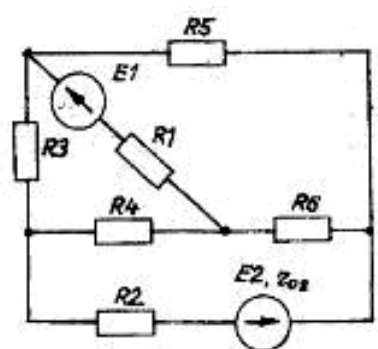


Рис.1.8

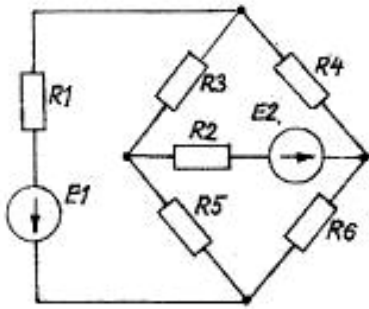


Рис.1.9

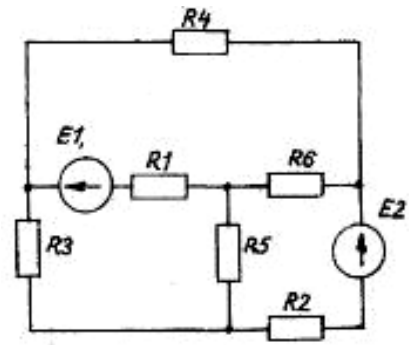


Рис.1.10

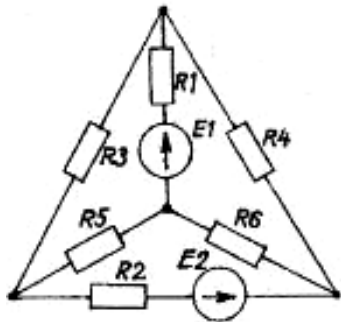


Рис.1.11

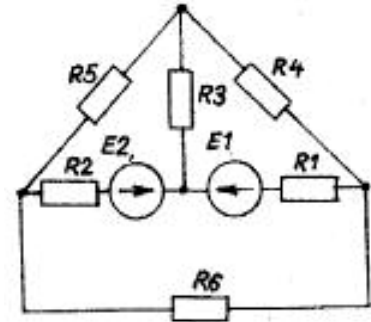


Рис.1.12

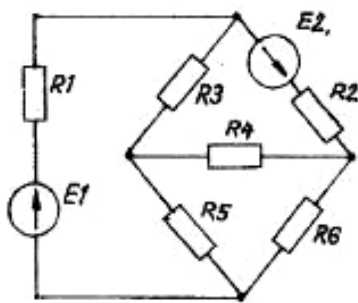


Рис.1.13

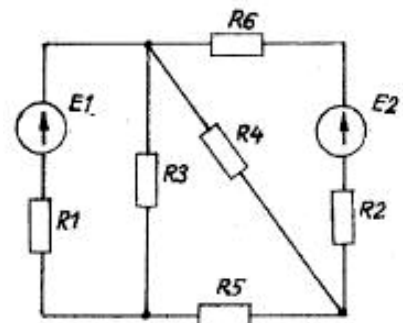


Рис.1.14

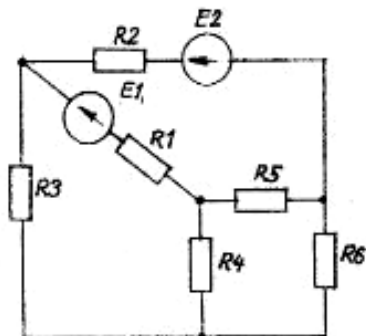


Рис.1.15

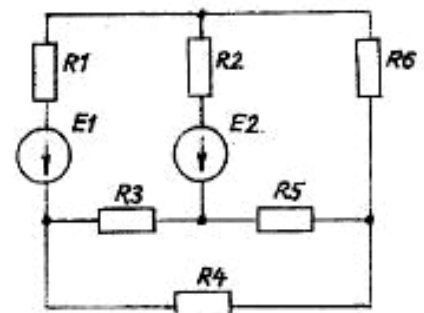


Рис.1.16

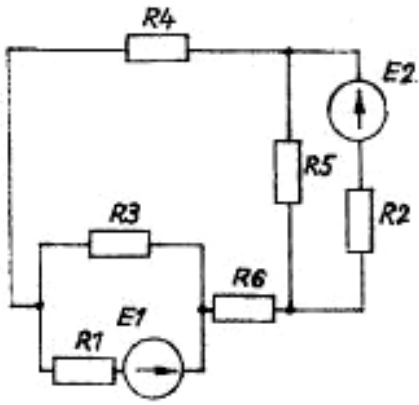


Рис.1.17

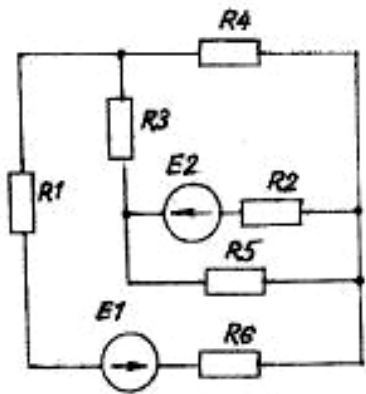


Рис.1.18

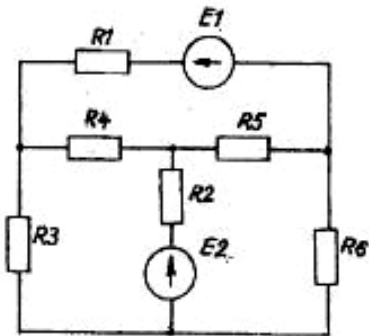


Рис.1.19

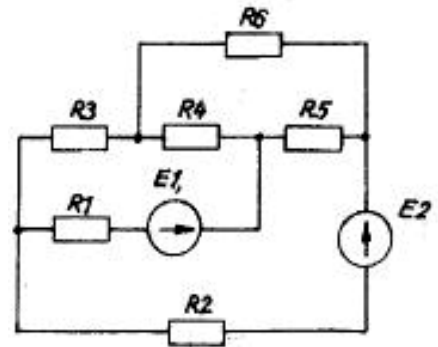


Рис.1.20

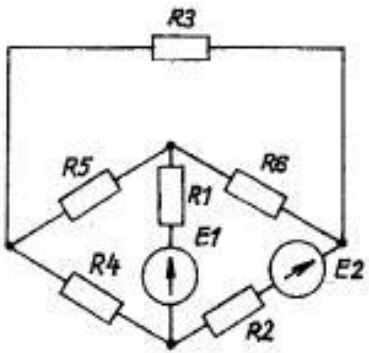


Рис.1.21

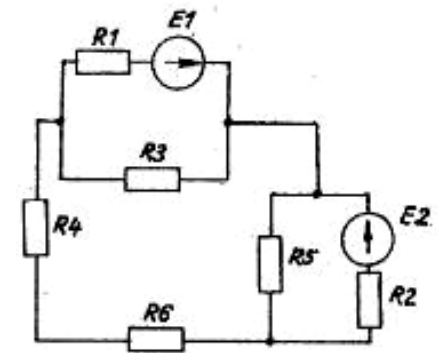


Рис.1.22

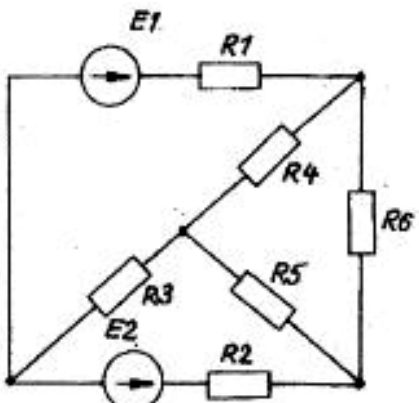


Рис.1.23

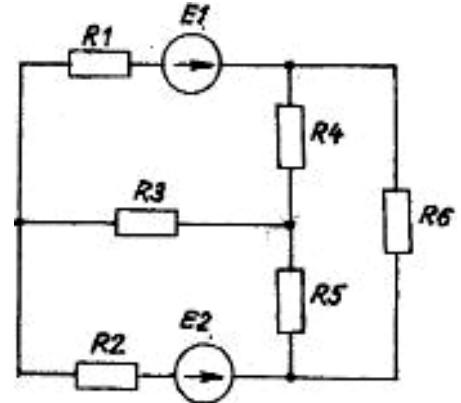


Рис.1.24

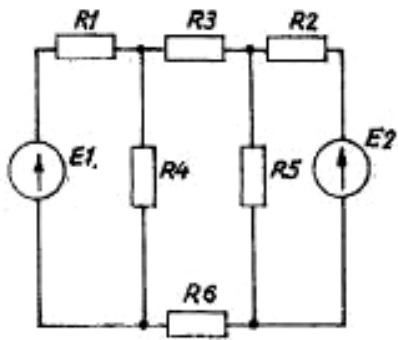


Рис.1.25

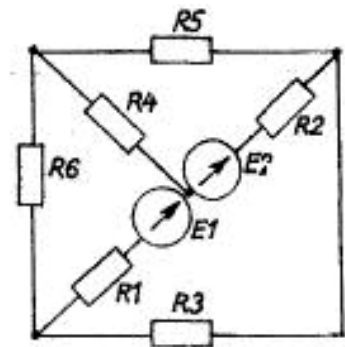


Рис.1.26

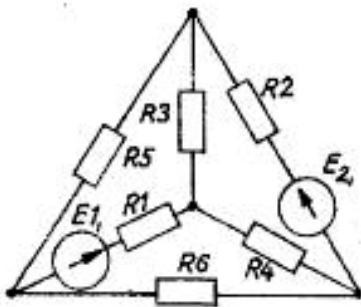


Рис.1.27

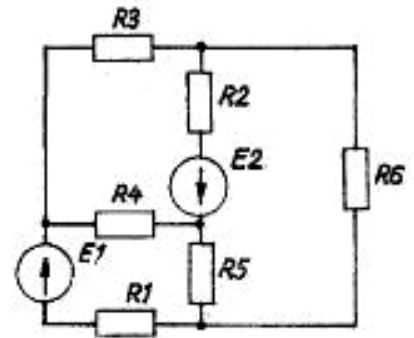


Рис.1.28

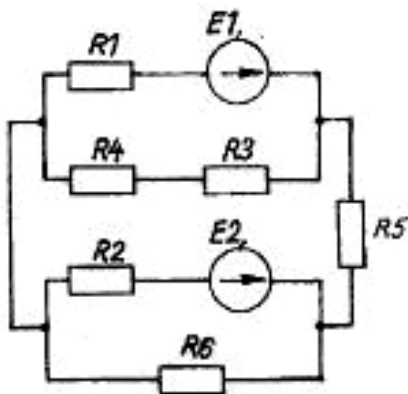


Рис.1.29

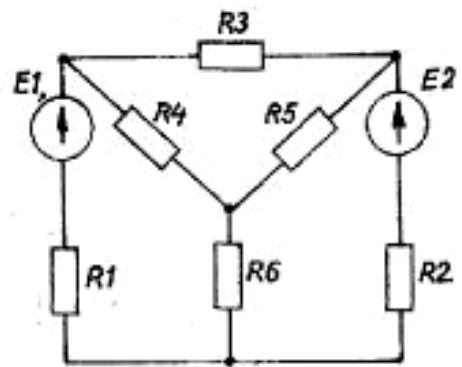


Рис.1.30

## 1.2 Методика розрахунку лінійних електричних ланцюгів постійного струму

Для електричної схеми на рис.1.31, виконаємо наступне:

- 1) складемо на основі законів Кірхгофа систему рівнянь для визначення струмів у всіх ланках схеми;
- 2) визначимо струми у всіх ланках схеми, використовуючи метод контурних струмів;
- 3) складемо баланс потужностей для заданої схеми;
- 4) результати розрахунків струмів зобразимо у вигляді таблиці;
- 5) побудуємо потенціальну діаграму для кожного контуру.

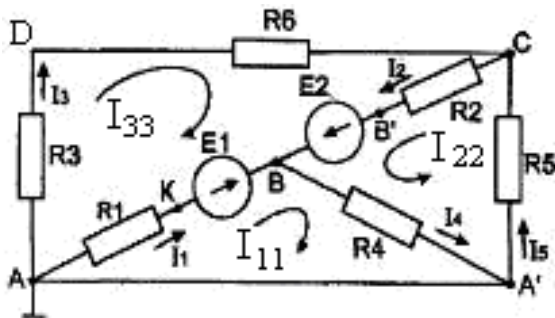


Рис.1.31

Дано:  $E_1 = 40 \text{ В}$ ,  $E_2 = 60 \text{ В}$ ,  $R_1 = 18 \text{ Ом}$ ,

$R_2 = 36 \text{ Ом}$ ,  $R_3 = 16 \text{ Ом}$ ,  $R_4 = 24 \text{ Ом}$ ,

$R_5 = 40 \text{ Ом}$ ,  $R_6 = 34 \text{ Ом}$

Визначити:  $I_1, I_2, I_3, I_4, I_5$ .

Рішення.

- 1) Складемо систему рівнянь, застосовуючи закони Кірхгофа для визначення струмів у кожному ланцюгу.

По першому закону Кірхгофа складемо рівняння, для:

- вузла В  $I_1 + I_2 = I_4$ , (1.1)

- вузла А (А')  $I_3 + I_1 + I_5 = I_4$ , (1.2)

- вузла С  $I_3 + I_5 = I_2$ . (1.3)

По другому закону Кірхгофа складемо рівняння для:

- контуру ADCB  $R_3 \cdot I_3 + R_6 \cdot I_3 + R_2 \cdot I_2 - R_1 \cdot I_1 = E_2 - E_1$ , (1.4)

- контуру BC A'  $R_4 \cdot I_4 + R_5 \cdot I_5 + R_2 \cdot I_2 = E_2$ , (1.5)

- контуру АСА'  $R_1 \cdot I_1 + R_4 \cdot I_4 = E_1$ , (1.6)

при чому в контурі ЕРС береться зі знаком «+», якщо напрям ЕРС співпадає з обходом контуру, якщо не співпадає – знак «-», падіння напруги на опорі контуру

береться зі знаком «+», якщо напрям струму співпадає з обходом контуру, якщо не співпадає – знак «-».

Складемо систему рівнянь з формул (1.1) – (1.6) і підставимо відповідні числові значення.

$$\left. \begin{aligned} (16 + 34) \cdot I_3 + 36 \cdot I_2 - 18 \cdot I_1 &= 60 - 40 \\ 24 \cdot I_4 + 40 \cdot I_5 + 36 \cdot I_2 &= 60 \\ 18 \cdot I_1 + 24 \cdot I_4 &= 40 \\ I_1 + I_2 &= I_4 \\ I_3 + I_1 + I_5 &= I_4 \\ I_3 + I_5 &= I_2 \end{aligned} \right\} \quad (1.7)$$

Підставимо значення струмів  $I_4$  та  $I_5$  з четвертого та шостого рівнянь в перші три рівняння системи (1.7).

$$\left. \begin{aligned} 50 \cdot I_3 + 36 \cdot I_2 - 18 \cdot I_1 &= 20 \\ 24 \cdot (I_1 + I_2) + 40 \cdot (I_2 - I_3) + 36 \cdot I_2 &= 60 \\ 18 \cdot I_1 + 24 \cdot (I_1 + I_2) &= 40 \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Розкриємо дужки та перетворимо систему.

$$\left. \begin{aligned} -18 \cdot I_1 + 36 \cdot I_2 + 50 \cdot I_3 &= 20 \\ 24 \cdot I_1 + 100 \cdot I_2 + 40 \cdot I_3 &= 60 \\ 42 \cdot I_1 + 24 \cdot I_2 + 0 \cdot I_3 &= 40 \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

Знайдемо рішення системи (1.9) по методу Крамера. Основна матриця  $R$ , допоміжна матриця  $E$  буде мати вигляд:

$$R = \begin{vmatrix} -18 & 36 & 50 \\ 24 & 100 & -40 \\ 42 & 24 & 0 \end{vmatrix}; \quad E = \begin{vmatrix} 20 \\ 60 \\ 40 \end{vmatrix}. \quad (1.10)$$

Визначник основної матриці:

$$\Delta = \begin{vmatrix} -18 & 36 & 50 \\ 24 & 100 & -40 \\ 42 & 24 & 0 \end{vmatrix} = -18 \cdot 100 \cdot 0 + 36 \cdot (-40) \cdot 42 + 24 \cdot 24 \cdot 50 - 50 \cdot 100 \cdot 42 - \\ - 36 \cdot 24 \cdot 0 - 24 \cdot (-40) \cdot (-18) = -258960.$$

Визначники допоміжних матриць:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 20 & 36 & 50 \\ 60 & 100 & -40 \\ 40 & 24 & 0 \end{vmatrix} = 20 \cdot 100 \cdot 0 + 36 \cdot (-40) \cdot 40 + 60 \cdot 24 \cdot 50 - 50 \cdot 100 \cdot 40 - \\ - 36 \cdot 60 \cdot 0 - 24 \cdot (-40) \cdot 20 = -166400.$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} -18 & 20 & 50 \\ 24 & 60 & -40 \\ 42 & 40 & 0 \end{vmatrix} = -18 \cdot 60 \cdot 0 + 20 \cdot (-40) \cdot 42 + 24 \cdot 40 \cdot 50 - 50 \cdot 60 \cdot 42 - \\ - 24 \cdot 20 \cdot 0 - 40 \cdot (-40) \cdot (-18) = -140400.$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} -18 & 36 & 20 \\ 24 & 100 & 60 \\ 42 & 24 & 40 \end{vmatrix} = -18 \cdot 100 \cdot 40 + 36 \cdot 60 \cdot 42 + 24 \cdot 24 \cdot 20 - 20 \cdot 100 \cdot 42 - \\ - 36 \cdot 24 \cdot 40 - 24 \cdot 60 \cdot (-18) = -62400.$$

Струми будуть дорівнювати:

$$I_1 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-166400}{-258960} = 0,6426 \text{ (A)}$$

$$I_2 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-140400}{-258960} = 0,5422 \text{ (A)}$$

$$I_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-62400}{-258960} = 0,2410 \text{ (A)}$$

$$I_4 = I_1 + I_2 = 0,6426 + 0,5422 = 1,1848 \text{ (A)}$$

$$I_5 = I_2 - I_3 = 0,5422 - 0,2410 = 0,3012 \text{ (A)}$$

## 2) Метод контурних струмів

Складемо рівняння по II закону Кірхгофа для контурних струмів, для:

$$\text{- контуру ADCB } (R_3 + R_6) \cdot I_{33} + R_2 \cdot (I_{33} + I_{22}) + R_1 \cdot (I_{33} - I_{11}) = E_2 - E_1, \quad (1.11)$$

$$\text{- контуру BC A'} \quad R_2 \cdot (I_{22} + I_{33}) + R_4(I_{22} + I_{11}) + R_5 \cdot I_{22} = E_2, \quad (1.12)$$

$$\text{- контуру AB A'} \quad R_1 \cdot (I_{11} - I_{33}) + R_4 \cdot (I_{11} + I_{22}) = E_1. \quad (1.13)$$

Підставимо числові значення:

$$\left. \begin{aligned} (16 + 34) \cdot I_{33} + 36 \cdot (I_{33} + I_{22}) + 18 \cdot (I_{33} - I_{11}) &= 60 - 40 \\ 36 \cdot (I_{22} + I_{33}) + 24 \cdot (I_{22} + I_{11}) + 40 \cdot I_{22} &= 60 \\ 18 \cdot (I_{11} - I_{33}) + 24 \cdot (I_{11} + I_{22}) &= 40 \end{aligned} \right\} \quad (1.14)$$

або

$$\left. \begin{aligned} -18 \cdot I_{11} + 36 \cdot I_{22} + 104 \cdot I_{33} &= 20 \\ 24 \cdot I_{11} + 100 \cdot I_{22} + 36 \cdot I_{33} &= 60 \\ 42 \cdot I_{11} + 24 \cdot I_{22} - 18 \cdot I_{33} &= 40 \end{aligned} \right\} \quad (1.15)$$

Знайдемо рішення системи (1.15) по методу Крамера. Основна матриця R, допоміжна матриця E буде мати вигляд:

$$R = \begin{vmatrix} -18 & 36 & 104 \\ 24 & 100 & 36 \\ 42 & 24 & -18 \end{vmatrix}; \quad E = \begin{vmatrix} 20 \\ 60 \\ 40 \end{vmatrix}. \quad (1.16)$$

Визначник основної матриці:

$$\Delta = \begin{vmatrix} -18 & 36 & 104 \\ 24 & 100 & 36 \\ 42 & 24 & -18 \end{vmatrix} = -18 \cdot 100 \cdot (-18) + 36 \cdot 36 \cdot 42 + 24 \cdot 24 \cdot 104 - 104 \cdot 100 \cdot 42 - \\ - 24 \cdot 36 \cdot (-18) - 24 \cdot 36 \cdot (-18) = -258960.$$

Визначники допоміжних матриць:

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 20 & 36 & 104 \\ 60 & 100 & 36 \\ 40 & 24 & -18 \end{vmatrix} = 20 \cdot 100 \cdot (-18) + 36 \cdot 36 \cdot 40 + 60 \cdot 24 \cdot 104 - 104 \cdot 100 \cdot 40 - \\ - 24 \cdot 36 \cdot (-18) - 60 \cdot 36 \cdot (-18) = -228800.$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} -18 & 20 & 104 \\ 24 & 60 & 36 \\ 42 & 40 & -18 \end{vmatrix} = -18 \cdot 60 \cdot (-18) + 20 \cdot 36 \cdot 42 + 24 \cdot 40 \cdot 104 - 104 \cdot 60 \cdot 42 - \\ - 24 \cdot 20 \cdot (-18) - 40 \cdot 36 \cdot (-18) = -78000.$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} -18 & 36 & 20 \\ 24 & 100 & 60 \\ 42 & 24 & 40 \end{vmatrix} = -18 \cdot 100 \cdot 40 + 36 \cdot 60 \cdot 42 + 24 \cdot 24 \cdot 20 - 20 \cdot 100 \cdot 42 - \\ - 36 \cdot 24 \cdot 40 - 24 \cdot 60 \cdot (-18) = -62400.$$

Струми будуть дорівнювати:

$$I_{11} = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{-228800}{-258960} = 0,8835 \text{ (A)}$$

$$I_{22} = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{-228800}{-258960} = 0,3012 \text{ (A)}$$

$$I_{33} = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-62400}{-258960} = 0,2410 \text{ (A)}$$

$$I_1 = I_{11} - I_{33} = 0,8835 - 0,2410 = 0,6426 \text{ (A)}$$

$$I_2 = I_{22} + I_{33} = 0,3012 + 0,2410 = 0,5422 \text{ (A)}$$

$$I_3 = I_{33} = 0,2410 \text{ (A)}$$

$$I_4 = I_{11} + I_{22} = 0,8835 + 0,3012 = 1,1847 \text{ (A)}$$

$$I_5 = I_{22} = 0,3012 \text{ (A)}$$

3) Складемо баланс потужностей для заданої схеми

Джерела  $E_1$  та  $E_2$  виробляють електричну енергію, так як напрями ЕРС і струмів в ланках з джерелами співпадають. Баланс потужностей для заданої схеми запишемо так:

$$E_1 \cdot I_1 + E_2 \cdot I_2 = R_1 \cdot I_1^2 + R_2 \cdot I_2^2 + (R_3 + R_6) \cdot I_3^2 + R_4 \cdot I_4^2 + R_5 \cdot I_5^2, \quad (1.17)$$

$$40 \cdot 0,6426 + 60 \cdot 0,5422 = 18 \cdot 0,6426^2 + 36 \cdot 0,5422^2 + (16 + 34) \cdot 0,241^2 +$$

$$+ 24 \cdot 1,1847^2 + 40 \cdot 0,3012^2,$$

$$58,236 \text{ (Вт)} \approx 58,233 \text{ (Вт)}$$

З врахуванням похибки розрахунків баланс потужностей зійшовся.

4) Результати розрахунків струмів по пунктам 1) та 2) наведемо у вигляді таблиці за для порівняння.

Таблиця 1.2

Результати розрахунків

Метод	$I_1, \text{(A)}$	$I_2, \text{(A)}$	$I_3, \text{(A)}$	$I_4, \text{(A)}$	$I_5, \text{(A)}$
законів Кірхгофа	0,6426	0,5422	0,2410	1,1848	0,3012
контурних струмів	0,6426	0,5422	0,2410	1,1847	0,3012

5) Побудуємо потенційну діаграму для контуру ADCB'ВКА

Знаючи величину й напрямок струмів в ланках й ЕРС, а також величини опорів, обчислимо потенціали всіх точок контуру при переході з одного елемента до іншого. Почнемо обхід з точки А.

$$\varphi_A = 0 \text{ (В)}$$

$$\varphi_D = \varphi_A - R_3 \cdot I_3 = 0 - 16 \cdot 0,2410 = -3,856 \text{ (В)}$$

$$\varphi_C = \varphi_D - R_6 \cdot I_3 = -3,856 - 34 \cdot 0,2410 = -12,05 \text{ (В)}$$

$$\varphi_{B'} = \varphi_C - R_2 \cdot I_2 = -12,05 - 36 \cdot 0,5422 = -31,57 \text{ (В)}$$

$$\varphi_B = \varphi_{B'} + E_2 = -31,57 + 60 = 28,43 \text{ (В)}$$

$$\varphi_K = \varphi_B - E_1 = 28,43 - 40 = -11,57 \text{ (В)}$$

Будуємо потенційну діаграму. По осі абсцис відкладаємо опір контуру в тій послідовності, в котрій приводимо обхід контуру, відкладаючи опір один до одного, по осі ординат відмічаємо точки відповідних потенціалів з урахування їх знаку.

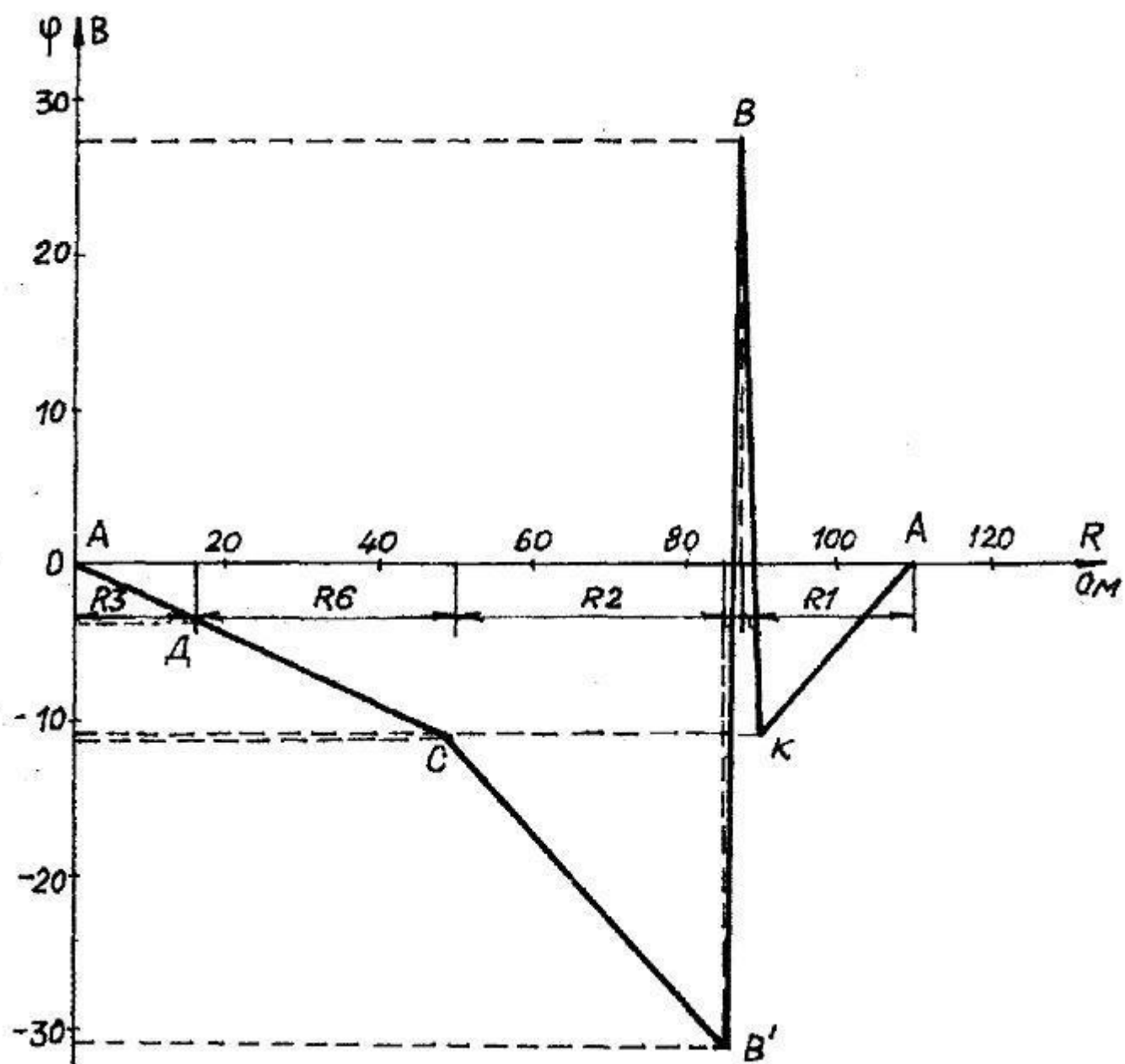


Рис.1.32 Потенційна діаграма контуру ADCB'ВКА

## 2 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ ОДНОФАЗНИХ, ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ЗМІННОГО СТРУМУ

### 2.1 Розрахунок однофазних лінійних електричних схем змінного струму

До зажимів електричної схеми відключено джерело синусоїдальної напруги  $u = U_m \sin(\omega t + \varphi_u)$  В з частотою  $f = 50$  Гц. Амплітуда, початкова фаза напруги й параметри елементів схеми задані в таблиці 2.1.

Потрібно виконати наступне:

- 1) намалювати схему заміщення електричної цепі, відповідну номеру варіанту, розрахувати реактивний опір елементів цепі;
- 2) визначити діючі значення струмів у всіх ланках схеми;
- 3) записати рівняння миттєвого значення струму джерела;
- 4) скласти баланс активних й реактивних потужностей;
- 5) побудувати векторну діаграму струмів, сумісну з топографічною векторною діаграмою напруги.

Таблиця 2.1

Числові параметри однофазних схем змінного струму

№	$U_m$ , В	$\varphi_u$ , град.	$R_1$ , Ом	$R_2$ , Ом	$L_1$ , мГн	$L_2$ , мГн	$C_1$ , мкФ	$C_2$ , мкФ
1	180	60	25	50	79,5	127,2	318	79,5
2	311	30	20	30	63,6	127,4	79,5	53,0
3	540	-45	50	100	159	254,4	63,5	39,8
4	320	90	40	60	127,2	190,8	39,8	53
5	180	0	20	30	136,5	70	140	150
6	32	45	7,5	15	23,8	38,2	42,5	199
7	54	60	10	20	32	50	320	200
8	20	-20	15	30	16	128	85	109
9	32	30	30	45	190,8	95,4	106	106
0	54	60	10	15	63,6	31,8	318	318

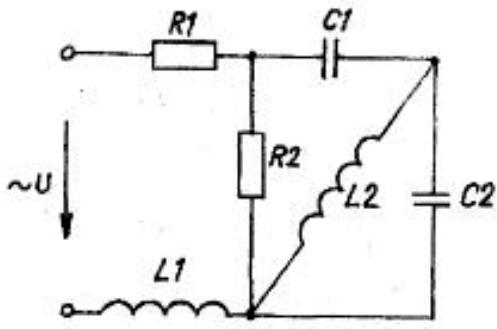


Рис.2.1

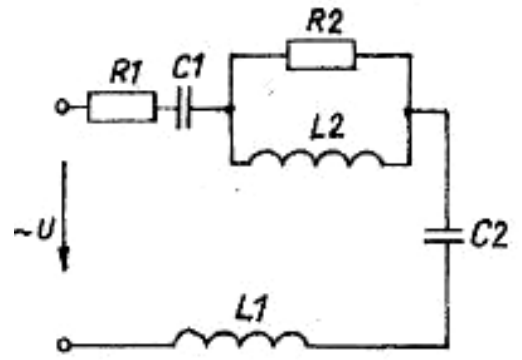


Рис.2.2

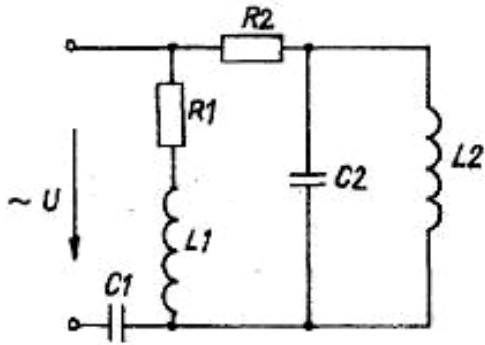


Рис.2.3

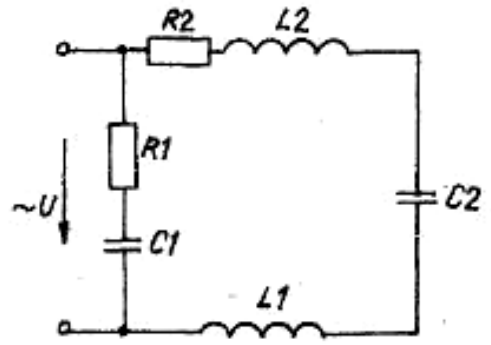


Рис.2.4

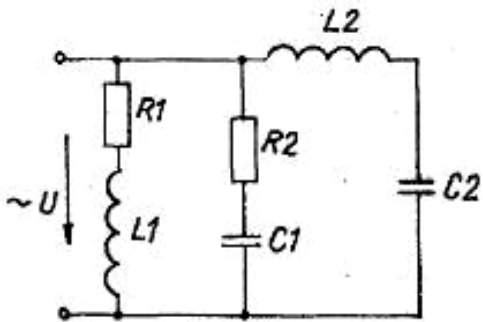


Рис.2.5

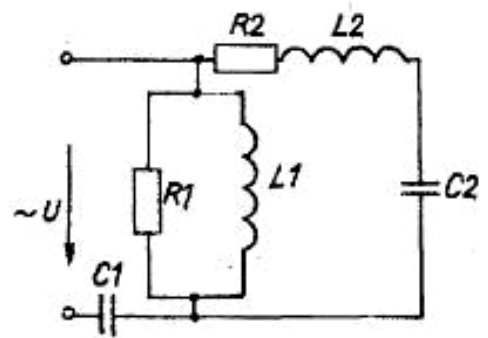


Рис.2.6

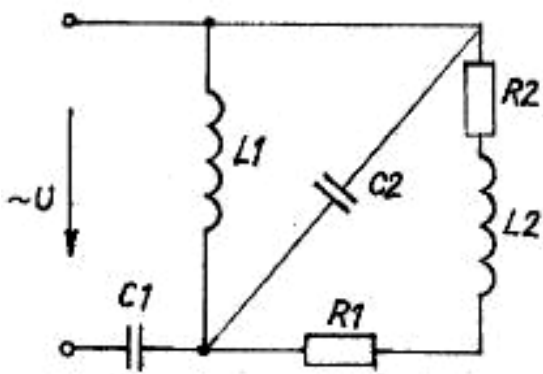


Рис.2.7

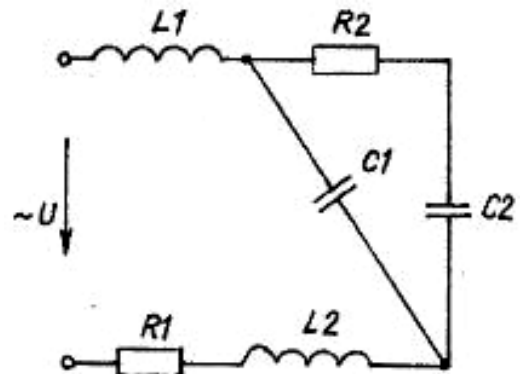


Рис.2.8

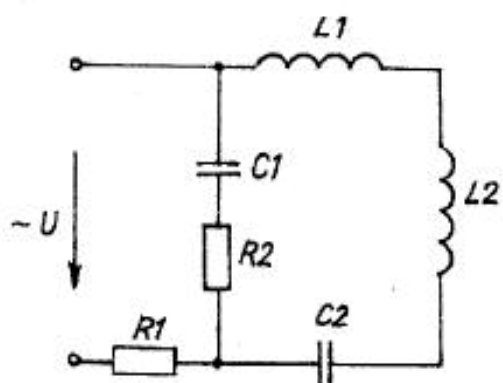


Рис.2.9

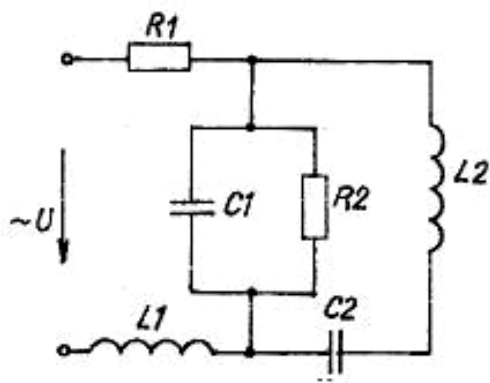


Рис.2.10

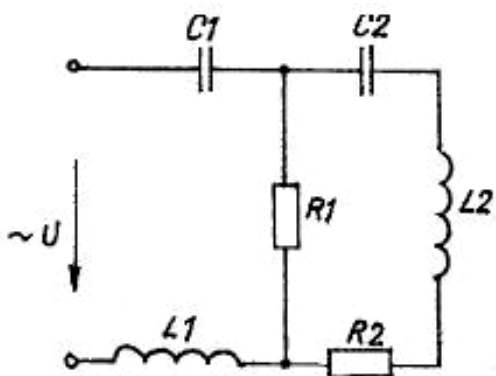


Рис.2.11

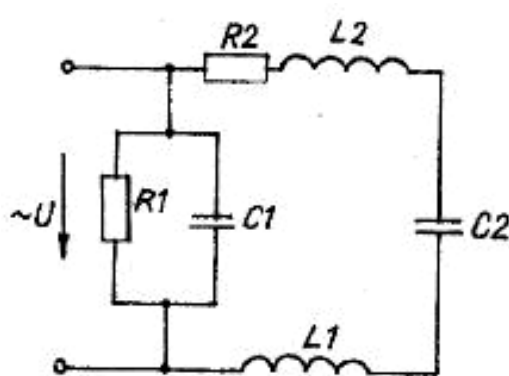


Рис.2.12

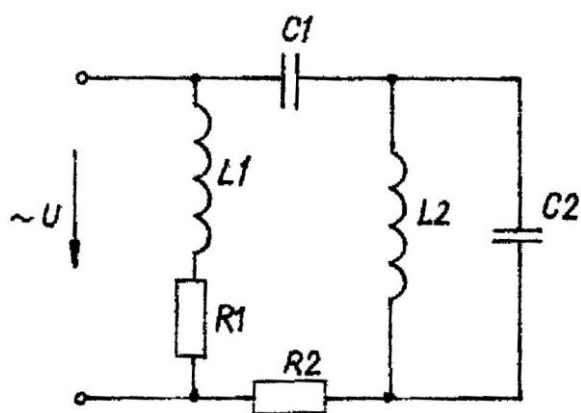


Рис.2.13

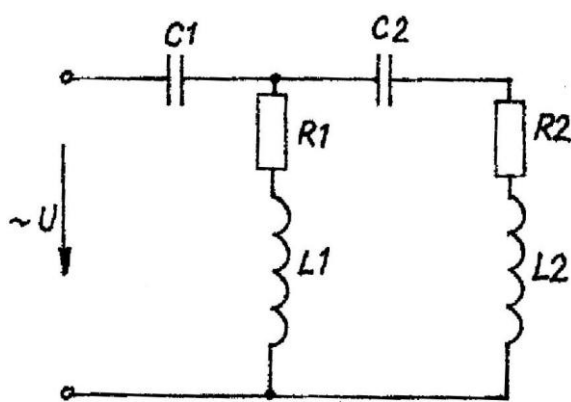


Рис.2.14

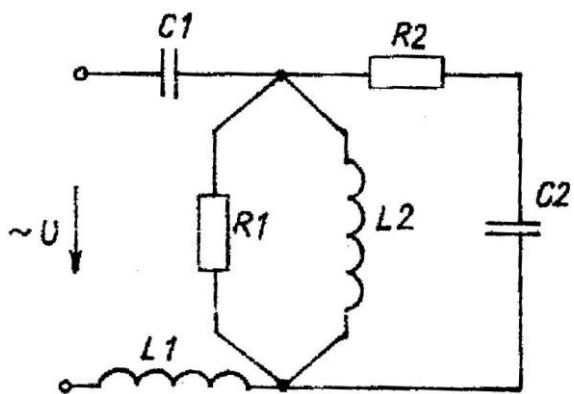


Рис.2.15

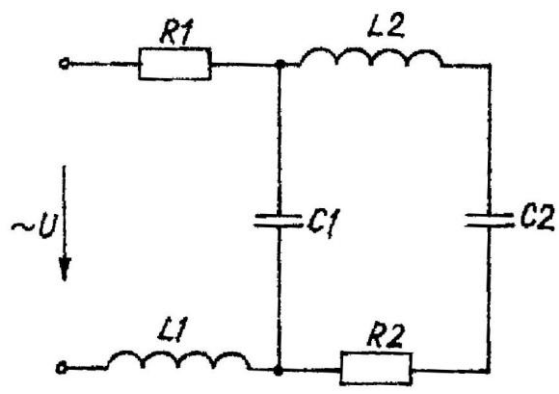


Рис.2.16

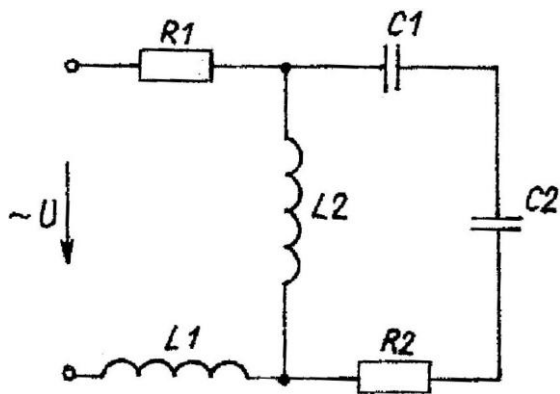


Рис.2.17

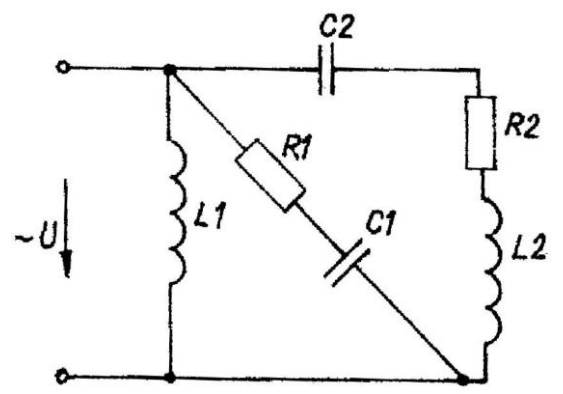


Рис.2.18

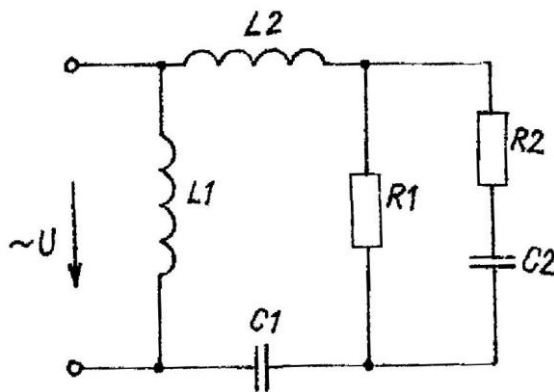


Рис.2.19

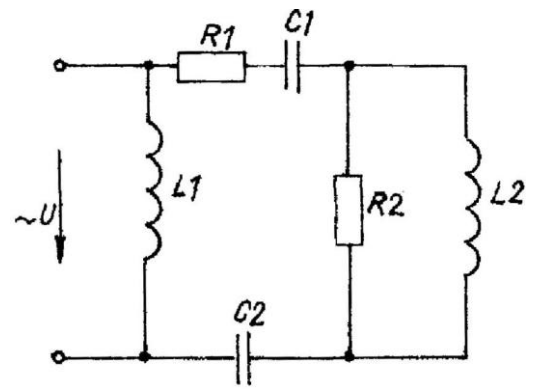


Рис.2.20

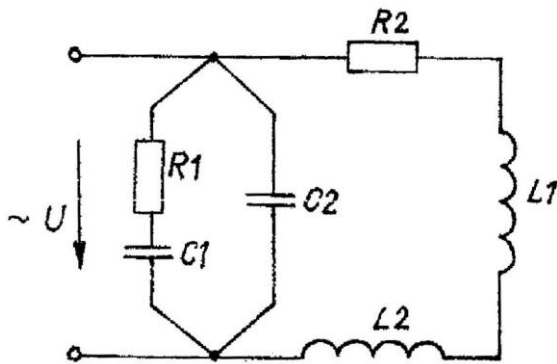


Рис.2.21

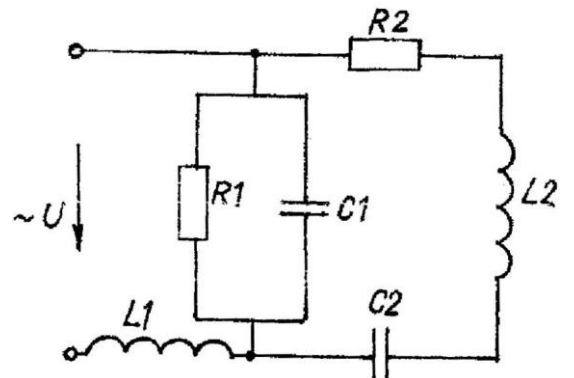


Рис.2.22

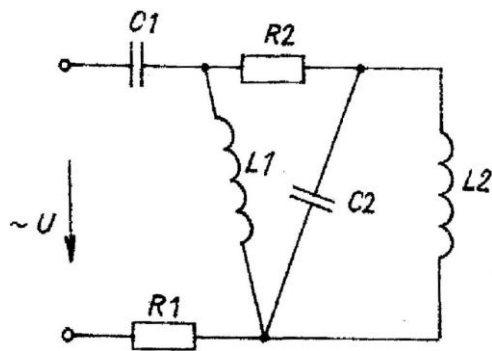


Рис.2.23

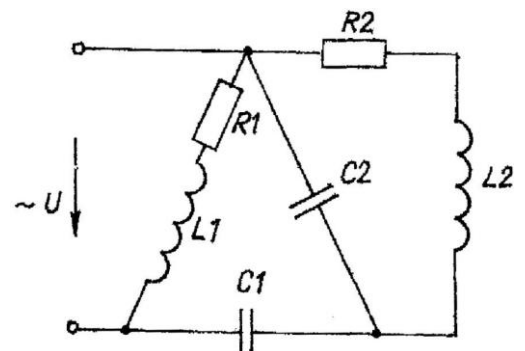


Рис.2.24

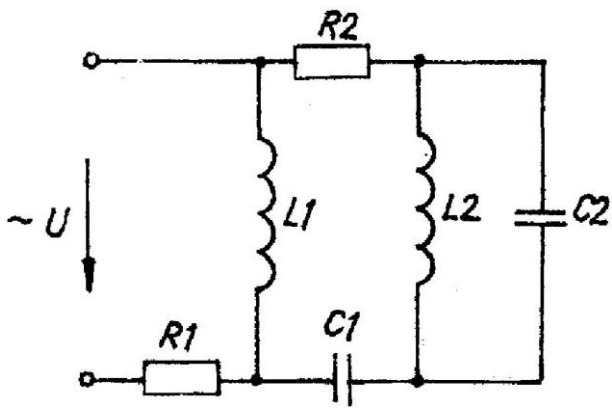


Рис.2.25

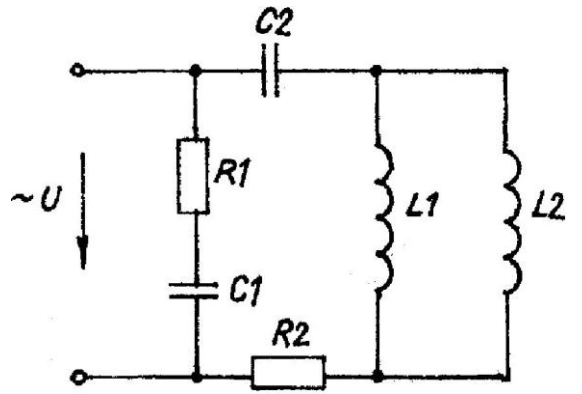


Рис.2.26

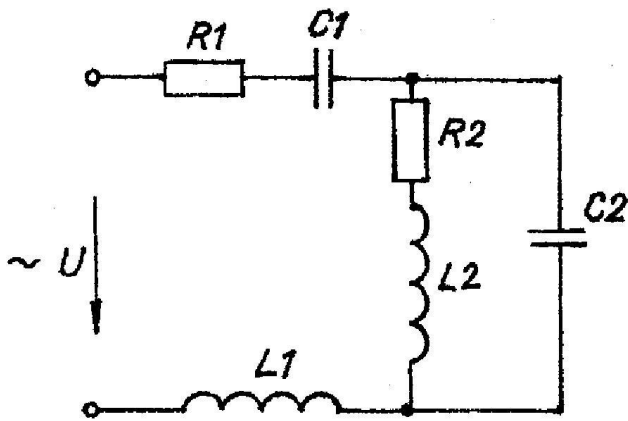


Рис.2.27

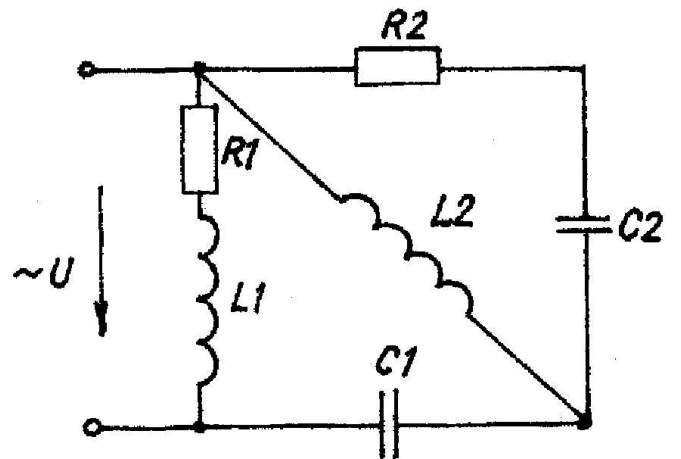


Рис.2.28

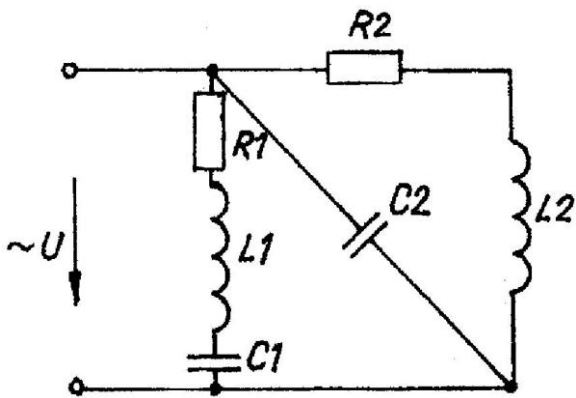


Рис.2.29

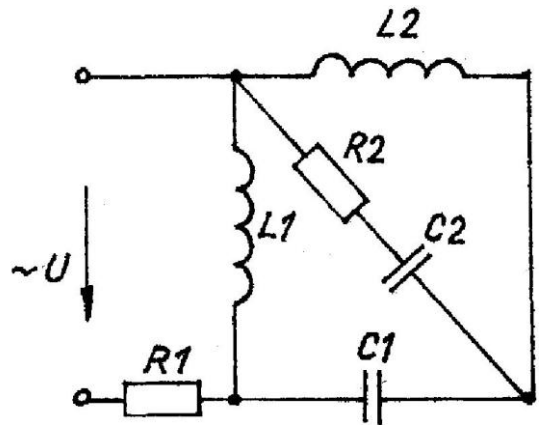


Рис.2.30

## 2.2 Методика розрахунку однофазних лінійних електричних схем змінного струму

До зажимів електричної схеми (рис.2.35) підключено джерело синусоїдальної напруги  $u = 31 \sin(\omega t + 45^\circ)$  В з частотою  $f = 50$  Гц. Параметри схеми:  $R_1 = 5$  Ом,  $R_2 = 8$  Ом,  $L_1 = 39,8$  мГн,  $L_2 = 19$  мГн,  $C_1 = 162,5$  мкФ,  $C_2 = 192$  мкФ.

Необхідно виконати наступне:

- 1) визначити реактивні опори елементів схеми;
- 2) визначити діючі значення струмів у всіх ланках схеми;
- 3) записати рівняння миттєвого значення струму джерела;
- 4) скласти баланс активних й реактивних потужностей;
- 5) побудувати векторну діаграму струмів, сумісну з топографічною векторною діаграмою напруги.

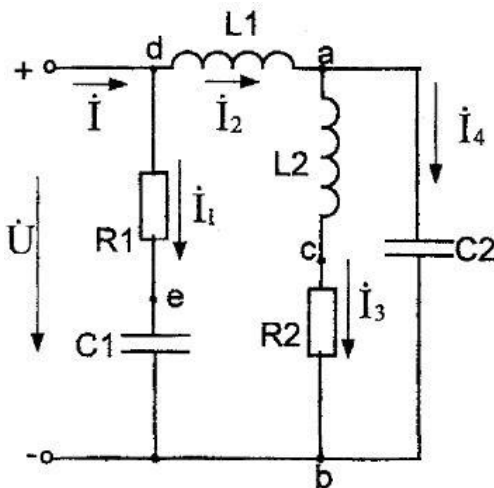


Рис.2.31

Дано:  $R_1 = 5$  Ом,  $R_2 = 8$  Ом,  $L_1 = 39,8$  мГн,  
 $L_2 = 19$  мГн,  $C_1 = 162,5$  мкФ,  
 $C_2 = 192$  мкФ.

Визначити:  $X_{L1}$ ,  $X_{L2}$ ,  $X_{C1}$ ,  $X_{C2}$ ,  $I$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ ,  $i$

### Рішення

1) Реактивні опори елементів схеми:

$$X_{L1} = \omega L_1 = 2 \pi f L_1 = 314 \cdot 39,8 \cdot 10^{-3} = 12,5 \text{ (Ом)}$$

$$X_{L2} = \omega L_2 = 2 \pi f L_2 = 314 \cdot 19 \cdot 10^{-3} = 6 \text{ (Ом)}$$

$$X_{C1} = \frac{1}{\omega C_1} = \frac{1}{2 \pi f C_1} = \frac{1 \cdot 10^6}{314 \cdot 162,5} = 19,6 \text{ (Ом)}$$

$$X_{C2} = \frac{1}{\omega C_2} = \frac{1}{2 \pi f C_2} = \frac{1 \cdot 10^6}{314 \cdot 192} = 16,6 \text{ (Ом)}$$

2) Розрахунок струмів в ланках схеми виконуємо методом еквівалентних перетворень.

Представимо схему, що наведена на рис. 2.35 в наступному вигляді:

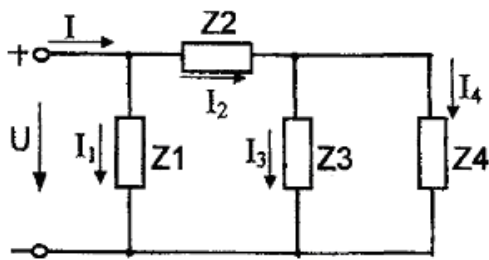


Рис.2.32

Знайдемо комплексний опір у ланках, потім

ділянок схеми й всієї схеми:

$$Z_1 = R_1 - jX_{C1} = 5 - j \cdot 19,6 = \sqrt{5^2 + 19,6^2} \cdot e^{j \cdot \arctg \frac{-19,6}{5}} = 20,2 \cdot e^{-j75,6^\circ} \text{ (Ом)}$$

$$Z_2 = jX_{L1} = j \cdot 12,5 = 12,5e^{j90^\circ} \text{ (Ом)}$$

$$Z_3 = R_2 + jX_{L2} = 8 + j6 = 10e^{j37^\circ} \text{ (Ом)}$$

$$Z_4 = -jX_{C2} = -j \cdot 16,6 = 16,6e^{-j90^\circ} \text{ (Ом)}$$

$$Z_{34} = \frac{Z_3 \cdot Z_4}{Z_3 + Z_4} = \frac{10e^{j37^\circ} \cdot 16,6e^{-j90^\circ}}{8 + j6 - j16,6} = \frac{166e^{-j53^\circ}}{8 - j10,6} = \frac{166e^{-j53^\circ}}{13,3e^{-j53^\circ}} = 12,5 \text{ (Ом)}$$

$$Z_{234} = Z_2 + Z_{34} = j12,5 + 12,5 = 17,7e^{j45^\circ} \text{ (Ом)}$$

$$Z_{\text{ЭКВ}} = \frac{Z_1 \cdot Z_{234}}{Z_1 + Z_{234}} = \frac{20,2e^{-j75,6^\circ} \cdot 17,7e^{j45^\circ}}{5 - j19,6 + j12,5 + 12,5} = \frac{357,54e^{-j30,6^\circ}}{17,5 - j7,1} = \frac{357,54e^{-j30,6^\circ}}{18,89e^{-j22,1^\circ}} = 18,92e^{-j8,5^\circ} \text{ (Ом)}$$

Виразимо діюче значення напруги в комплексній формі:

$$\dot{U} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} e^{j\psi_u} = \frac{311}{\sqrt{2}} e^{j45^\circ} = 220e^{j45^\circ} \text{ (В)}$$

Обчислимо струми у ланках й загальний струм схеми:

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}}{Z_1} = \frac{220e^{j45^\circ}}{20,2e^{-j75,6^\circ}} = 10,9e^{j120,6^\circ} \text{ (А)},$$

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{U}}{Z_{234}} = \frac{220e^{j45^\circ}}{17,7e^{j45^\circ}} = 12,4 \text{ (А)},$$

$$\dot{I} = \frac{\dot{U}}{Z_{\text{ЭКВ}}} = \frac{220e^{j45^\circ}}{18,92e^{-j8,5^\circ}} = 11,62e^{j53,5^\circ} \text{ (А) або}$$

$$\begin{aligned} \dot{I} &= \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = 10,9e^{j120,6^\circ} + 12,4 = 10,9 \cdot \cos(120,6^\circ) + j10,9 \cdot \sin(120,6^\circ) + 12,4 = \\ &= 6,85 + j9,4 = 11,6e^{j54^\circ} \text{ (А)} \end{aligned}$$

Для визначення струмів паралельних ланок  $\dot{I}_3$  й  $\dot{I}_4$  розрахуємо напругу на зажимах цих ланок.

$$\dot{U}_{ab} = \dot{U}_{34} = \dot{I}_2 \cdot Z_{34} = 12,4 \cdot 12,5 = 155 \text{ (В)}$$

$$\dot{I}_3 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_3} = \frac{155}{10e^{j37^\circ}} = 15,5e^{-j37^\circ} \text{ (А)}$$

$$\dot{I}_4 = \frac{\dot{U}_{ab}}{Z_4} = \frac{155}{16,6e^{-j90^\circ}} = 9,35e^{j90^\circ} \text{ (А)}$$

3) Рівняння миттєвого значення струму джерела:

$$i = I_m \sin(\omega t + \psi_i), \quad (2.1)$$

$$i = 11,6\sqrt{2} \cdot \sin(\omega t + 54^\circ) = 16,3 \sin(314t + 54^\circ) \text{ (А)}$$

4) Комплексна потужність схеми:

$$\dot{S} = \dot{U}\dot{I} = 220e^{j45^\circ} \cdot 11,6e^{-j54^\circ} = 2550e^{-j9^\circ} = 2510 - j400 \text{ (ВА)},$$

де  $S_{\text{ист}} = 2550 \text{ (ВА)}$ ,

$P_{\text{ист}} = 2510 \text{ (Вт)}$ ,

$Q_{\text{ист}} = -400 \text{ (ВАр)}$  – знак мінус визначає ємнісний характер навантаження в цілому.

Активна  $P_{\text{сп}}$  й реактивна  $Q_{\text{сп}}$  потужності споживачів:

$$P_{\text{сп}} = I_1^2 R_1 + I_3^2 R_2 = 10,9^2 \cdot 5 + 15,5^2 \cdot 8 = 2510 \text{ (Вт)},$$

$$Q_{\text{сп}} = (-X_{C1})I_1^2 + X_{L1}I_2^2 + X_{L2}I_3^2 + (-X_{C2})I_4^2 = 10,9^2 \cdot (-19,6) + 12,4^2 \cdot 12,5 + 15,5^2 \cdot 6 + 9,35^2 \cdot (-16,6) = -400 \text{ (ВАр)},$$

Баланс потужностей виконується:

$$P_{\text{ист}} = P_{\text{сп}} \text{ та } Q_{\text{ист}} = Q_{\text{сп}}$$

або в комплексному вигляді:

$$S = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 = \dot{U}_1 \dot{I}_1 + \dot{U}_2 \dot{I}_2 + \dot{U}_3 \dot{I}_3 + \dot{U}_4 \dot{I}_4,$$

де  $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 \cdot Z_2 = 12,4 \cdot j12,5 = j155 = 155e^{j90^\circ} \text{ (В)}$

$$\dot{U}_3 = \dot{U}_4 = \dot{U}_{34}$$

$$2510 - j400 = 220e^{j45^\circ} \cdot 10,9e^{-j120,6^\circ} + 155e^{j90^\circ} \cdot 12,4 + 155 \cdot 15,5e^{j37^\circ} + 155 \cdot 9,35e^{-j90^\circ}$$

$$2510 - j400 = 596,4 - j2322,7 + j1922 + 1918,7 + j1445,9 - j1449,3$$

$$2510 - j400 = 2515 - j403,9 - \text{баланс практично знаходиться.}$$

5) Напруга на елементах схеми заміщення

$$U_{de} = I_1 \cdot R_1 = 10,9 \cdot 5 = 54,5 \text{ (В)}$$

$$U_{eb} = I_1 \cdot X_{C1} = 10,9 \cdot 19,6 = 214 \text{ (В)}$$

$$U_{da} = U_2 = 155 \text{ (В)}$$

$$U_{ac} = I_3 \cdot X_{L2} = 15,5 \cdot 6 = 93 \text{ (В)}$$

$$U_{cb} = I_3 \cdot R_2 = 15,5 \cdot 8 = 124 \text{ (В)}$$

6) Побудуємо топографічну векторну діаграму на комплексній площині.

Виберемо масштаб:  $M_I = 2 \text{ (А/см)}$ ,  $M_U = 20 \text{ (В/см)}$ .

Визначимо довжини векторів струмів й напруги:

$$L_I = \frac{I}{M_I} = \frac{11,6}{2} = 5,8 \text{ (см)}$$

$$L_U = \frac{U}{M_U} = \frac{220}{20} = 11 \text{ (см)}$$

$$L_{I1} = \frac{I_1}{M_I} = \frac{10,9}{2} = 5,45 \text{ (см)}$$

$$L_{Ude} = \frac{U_{de}}{M_U} = \frac{54,5}{20} = 2,73 \text{ (см)}$$

$$L_{I2} = \frac{I_2}{M_I} = \frac{12,4}{2} = 6,2 \text{ (см)}$$

$$L_{Ueb} = \frac{U_{eb}}{M_U} = \frac{214}{20} = 10,7 \text{ (см)}$$

$$L_{I3} = \frac{I_3}{M_I} = \frac{15,5}{2} = 7,75 \text{ (см)}$$

$$L_{Uda} = \frac{U_{da}}{M_U} = \frac{155}{20} = 7,75 \text{ (см)}$$

$$L_{I4} = \frac{I_4}{M_I} = \frac{9,35}{2} = 4,68 \text{ (см)}$$

$$L_{Uac} = \frac{U_{ac}}{M_U} = \frac{93}{20} = 4,65 \text{ (см)}$$

$$L_{Uab} = \frac{U_{ab}}{M_U} = \frac{155}{20} = 7,75 \text{ (см)}$$

$$L_{Ucb} = \frac{U_{cb}}{M_U} = \frac{124}{20} = 6,2 \text{ (см)}$$

На комплексній площині в масштабі відкладаємо вектори струмі у відповідності з розрахунковими значеннями, при цьому додатні фазові кути відраховуємо від осі (+1) проти часової стрілки, а від'ємні – по часової стрілці. Так, вектор струму  $\dot{I}_1 = 10,9e^{j120,6^\circ}$  (А) повернуто відносно осі (+1) на кут  $120,6^\circ$ ,

а довжина його складає  $L_{I1} = 5,45$  (см), вектор струму  $\dot{I}_2 = 12,4$  (А) співпадає з дійсною віссю й довжина його складає  $L_{I2} = 6,2$  (см).

Топографічна векторна діаграма напруги характерна тим, що кожній точці діаграми відповідає точка електричної схеми. Побудова векторів напруги ведемо, контролюючи порядок розташування елементів схеми та орієнтуючи вектори напруги відносно векторів струму: на активному опорі струм й напруга співпадають по фазі, на індуктивному елементі напруга випереджує струм на  $90^\circ$ , а на ємнісному елементі напруга відстає від струму на  $90^\circ$ . Напрямок обходу ділянок схеми вибираємо, протилежно додатному напрямку струмів. Обхід починаємо з точки «b», потенціал якої приймає за вихідний ( $\varphi_b = 0$ ). Точку «b» розташовуємо в початку координат комплексної площини. При переході від точки «b» до точки «e» потенціал підвищується на величину падіння напруги на ємнісному опорі  $X_{C1}$ . Вектор цієї напруги  $\dot{U}_{eb}$  відстає по фазі від вектора струму  $\dot{I}_1$  на  $90^\circ$ . Кінець вектора  $\dot{U}_{eb}$  визначає потенціал точки «e». Потенціал точки «d» вище, ніж потенціал точки «e», на величину падіння напруги  $\dot{U}_{de} = R_1 \dot{I}_1$ . Вектор  $\dot{U}_{de}$  відкладаємо від точки «e» паралельно вектору струму  $\dot{I}_1$ . Кінець  $\dot{U}_{de}$  визначає потенціал точки «d». З'єднав відрізком прямої «b» та «d», получимо вектор напруги на зажимах схеми:  $\dot{U} = \dot{U}_{db} = 220e^{j45^\circ}$  (В).

Аналогічно будуюмо вектори напруги інших ланок схеми, зберігаючи обхід протилежний напрямку струму. Від точки «b» проводимо вектор  $\dot{U}_{cb}$  паралельно вектору  $\dot{I}_3$ . Кінець вектора  $\dot{U}_{cb}$  визначає потенціал точки «c». Від точки «c» відкладаємо вектор  $\dot{U}_{ac}$ , що випереджує вектор струму  $\dot{I}_2$  на  $90^\circ$ . Кінець  $\dot{U}_{da}$  визначає потенціал точки «d».

З'єднав відрізком прямої точки «b» та «a», отримаємо вектор напруги  $\dot{U}_{ab} = 155$  (В).

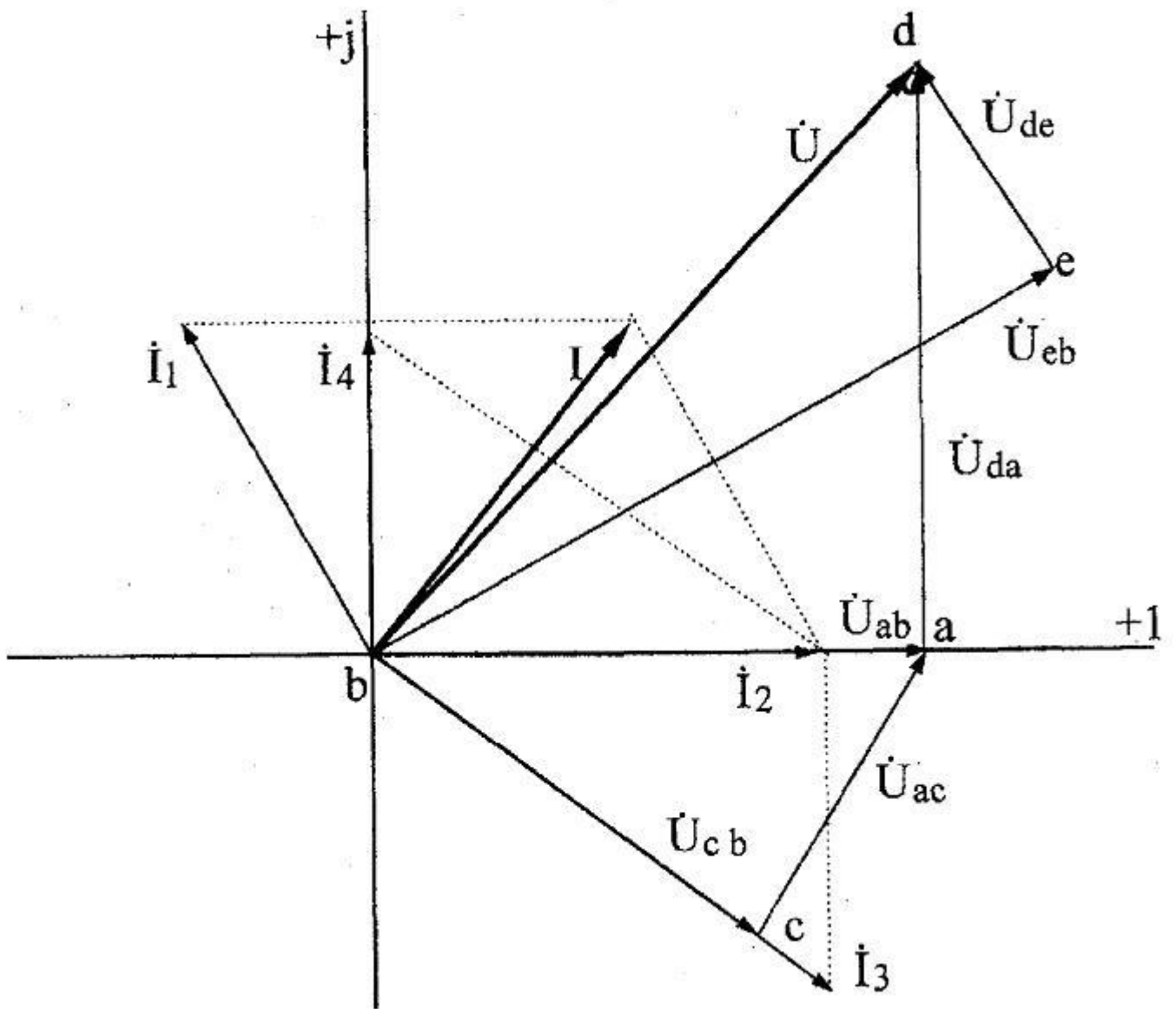


Рис.2.33

### 3 АНАЛІЗ ЕЛЕКТРИЧНОГО СТАНУ ЛІНІЙНИХ ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМ ЗМІННОГО СТРУМУ

#### 3.1 Розрахунок трифазних лінійних електричних схем змінного струму

У відповідності до даних з табл. 3.1 накреслити схему з'єднання опорів в трифазній цепі. Визначити:

- 1) фазні струми;
- 2) лінійні струми (при з'єднанні трикутником);
- 3) струм в нульовому проводі (при з'єднанні зіркою);
- 4) активну, реактивну і повну потужність кожної фази і всієї трифазної схеми;
- 5) кут здвигу фаз між струмом й напругою в кожній фазі;
- 6) накреслити в масштабі векторну діаграму трифазної схеми.

Таблиця 3.1

Числові параметри й схеми з'єднання трифазних лінійних електричних схем  
змінного струму

№	U <sub>л</sub> , В	U <sub>ф</sub> , В	Опір фаз									Схема з'єдн.
			R <sub>A</sub> , Ом	R <sub>B</sub> , Ом	R <sub>C</sub> , Ом	X <sub>LA</sub> , Ом	X <sub>LB</sub> , Ом	X <sub>LC</sub> , Ом	X <sub>CA</sub> , Ом	X <sub>CB</sub> , Ом	X <sub>CC</sub> , Ом	
1	346	-	15,36	25,8	12,5	12,9	-	21,65	-	30,7	-	Y
2	-	127	10	8	-	-	-	15	-	6	5	Y
3	380	-	19,05	8,45	28,4	11	-	33,8	-	7,1	-	Δ
4	-	127	26	36	-	-	16	45	36	-	-	Δ
5	-	220	31,2	13,5	43,3	21,7	-	62,3	-	13,5	-	Y
6	380	-	12	-	10	16	-	-	-	18	15	Y
7	38	-	1,88	3,8	3,1	0,68	-	2,57	-	2,2	-	Δ
8	220	-	-	12	-	-	16	28	35	-	-	Δ
9	-	100	18,12	8,2	17,68	8,48	-	17,68	-	5,75	-	Y
10	220	-	-	12	8	-	16	-	25	-	6	Y
11	-	127	6,14	2,87	1,37	5,15	-	3,76	-	4,1	-	Δ
12	-	220	-	6	10	18	-	-	8	15	-	Δ
13	1038	-	115	63	78	164	-	290	-	135	-	Y
14	-	220	4	-	8	3	-	6	-	12	-	Y
15	400	-	35,35	22,96	10,58	35,35	-	22,65	-	32,8	-	Δ
16	380	-	12	-	16	20	-	25	-	18	-	Δ
17	865	-	64,4	62,5	85,5	76,8	-	235	-	108,25	-	Y

№	$U_{л},$ В	$U_{ф},$ В	Опір фаз									Схема з'єдн.
			$R_A,$ Ом	$R_B,$ Ом	$R_C,$ Ом	$X_{LA},$ Ом	$X_{LB},$ Ом	$X_{LC},$ Ом	$X_{CA},$ Ом	$X_{CB},$ Ом	$X_{CC},$ Ом	
18	-	220	36	-	-	-	20	50	48	65	-	Y
19	50	-	1,73	2,8	2,5	1	-	4,33	-	2,8	-	Δ
20	-	127	-	8	-	12	-	-	-	12	20	Δ
21	220	-	50	72	-	-	32	90	72	-	-	Y
22	-	220	24	-	20	32	-	-	-	36	30	Y
23	380	-	100	80	-	-	-	150	-	60	50	Δ
24	-	127	-	-	120	80	-	160	-	250	60	Δ
25	380	-	-	60	100	180	-	-	80	150	-	Y
26	380	-	40	-	80	30	-	60	-	120	-	Y
27	-	220	120	-	160	200	-	250	-	180	-	Y
28	380	-	360	-	-	-	200	500	480	650	-	Δ
29	220	-	80	-	-	120	-	-	-	120	200	Y
30	-	600	300	126	156	328	-	580	-	270	-	Δ

При з'єднанні зіркою з нульовим проводом (Y) опори з індексом А включаються в фазу А, з індексом В – в фазу В, з індексом С – в фазу С. При з'єднанні трикутником (Δ) опори з індексом А включаються в фазу АВ, з індексом В – в фазу ВС, з індексом С – в фазу СА й відповідно записуються.

### 3.2 Методика розрахунку трифазних електричних схем змінного струму

3.2.1 Методика розрахунку трифазної електричної схеми змінного струму при з'єднанні споживачів зіркою

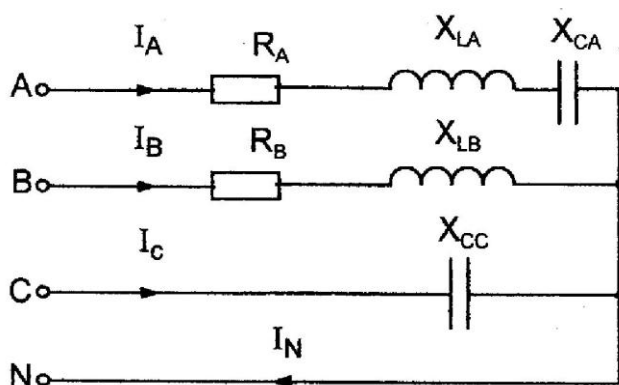


Рис.3.1

Дано:  $U_{л}=380$  (В),  $R_A=11$  Ом,

$X_{LA}=34$  Ом,  $X_{CA}=53$  Ом,  $R_B=11$  Ом,

$X_{LB}=19$  Ом,  $X_{CC}=22$  Ом.

Визначити:  $Z_A, Z_B, Z_C, I_A, I_B, I_C, P,$

$Q, S.$

Рішення

## Графоаналітичний метод розрахунку

1) При з'єднанні зіркою

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} \cdot U_{\phi}, \quad (3.1)$$

тому  $U_{\phi} = \frac{U_{\text{л}}}{\sqrt{3}} = \frac{380}{\sqrt{3}} = 220 \text{ (В)}$ .

2) Обчислюємо опір фаз й кути  $\varphi$ .

$$Z_A = \sqrt{R_A^2 + (X_{LA} - X_{CA})^2} = \sqrt{11^2 + (34 - 53)^2} = 22 \text{ (Ом)}$$

$$\varphi_A = \arctg\left(\frac{X_{LA} - X_{CA}}{R_A}\right) = \arctg\left(\frac{-19}{11}\right) = \arctg(-1,73) = -60^\circ \quad \text{- у фазі А напруга відстає від струму на кут } 60^\circ.$$

$$Z_B = \sqrt{R_B^2 + X_{LB}^2} = \sqrt{11^2 + 19^2} = 22 \text{ (Ом)}$$

$$\varphi_B = \arctg\left(\frac{X_{LB}}{R_A}\right) = \arctg\left(\frac{19}{11}\right) = \arctg(1,73) = 60^\circ \quad \text{- у фазі В напруга випереджує струм на кут } 60^\circ.$$

$$Z_C = X_{CC} = 22 \text{ (Ом)}$$

$\varphi_C = -90^\circ$  - у фазі С напруга відстає від струму на  $90^\circ$  так як в схему включено конденсатор.

3) Фазні струму можливо визначити наступним чином:

$$I_A = \frac{U_A}{Z_A} = \frac{220}{2} = 10 \text{ (А)}; \quad \varphi_A = -60^\circ;$$

$$I_B = \frac{U_B}{Z_B} = \frac{220}{2} = 10 \text{ (А)}; \quad \varphi_A = 60^\circ;$$

$$I_C = \frac{U_C}{Z_C} = \frac{220}{2} = 10 \text{ (А)}; \quad \varphi_A = -90^\circ;$$

4) За для того щоб обчислити струм в нейтральному проводі, необхідно побудувати векторну діаграму схеми. На векторній діаграмі під кутом  $120^\circ$  один відносно другого будуються вектори фазних напруг однакової довжини. Вектора

фазних струмів будуються в масштабі під обчисленими кутами  $\varphi$  по відношенню до фазних напруг. В фазі А навантаження носить ємнісний характер, тому струм  $I_A$  буде випереджувати напругу  $U_A$  на кут  $\varphi_A$ . В фазі В навантаження носить індуктивний характер, тому струм  $I_B$  буде відставати від напруги  $U_B$  на кут  $\varphi_B$ . У фазі С навантаження ємнісне тому струм  $I_C$  буде випереджувати напругу  $U_C$  на кут  $\varphi_C = 90^\circ$ .  $M_I = 2,5 \text{ A/cm}$  – масштаб.

$$L_{IA} = \frac{I_A}{M_I} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ (см)}$$

$$L_{IB} = \frac{I_B}{M_I} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ (см)}$$

$$L_{IC} = \frac{I_C}{M_I} = \frac{10}{2,5} = 4 \text{ (см)}$$

Струм в нейтральному проводі дорівнює геометричній (векторній) додаванню фазних струмів:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C \quad (3.2)$$

Вимірювши довжину вектора  $L_{IN}$ , знайдемо струм  $\dot{I}_N$

$$\dot{I}_N = L_{IN} \cdot M_I \quad (3.3)$$

$$\dot{I}_N = 5,7 \cdot 2,5 = 14,25 \text{ (A)}$$

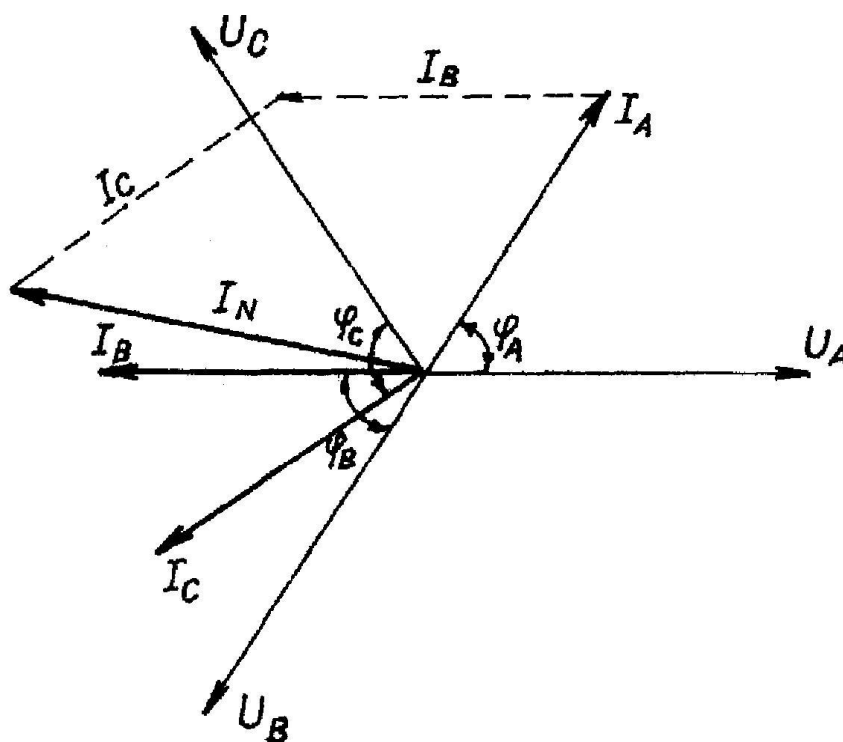


Рис.3.2

5) Визначимо активні потужності фаз:

$$P_A = U_A \cdot I_A \cdot \cos \varphi_A = 220 \cdot 10 \cdot \cos(-60^\circ) = 1100(\text{Вт}),$$

$$P_B = U_B \cdot I_B \cdot \cos \varphi_B = 220 \cdot 10 \cdot \cos(60^\circ) = 1100(\text{Вт}),$$

$$P_C = U_C \cdot I_C \cdot \cos \varphi_C = 220 \cdot 10 \cdot \cos(-90^\circ) = 0(\text{Вт}).$$

6) Активна потужність трифазної схеми:

$$P = P_A + P_B + P_C = 1100 + 1100 + 0 = 2200 (\text{Вт}).$$

7) Визначаємо реактивні потужності фаз:

$$Q_A = U_A \cdot I_A \cdot \sin \varphi_A = 220 \cdot 10 \cdot \sin(-60^\circ) = -1905(\text{ВАр}),$$

$$Q_B = U_B \cdot I_B \cdot \sin \varphi_B = 220 \cdot 10 \cdot \sin(60^\circ) = 1905 (\text{ВАр}),$$

$$Q_C = U_C \cdot I_C \cdot \sin \varphi_C = 220 \cdot 10 \cdot \sin(-90^\circ) = -2200 (\text{ВАр}).$$

8) Реактивна потужність трифазної схеми:

$$Q = Q_A + Q_B + Q_C = -1905 + 1905 - 2200 = -2200 (\text{ВАр}).$$

9) Обчислюємо повну потужність кожної фази й всієї схеми:

$$S_A = U_A \cdot I_A = 220 \cdot 10 = 2200 (\text{ВА}),$$

$$S_B = U_B \cdot I_B = 220 \cdot 10 = 2200 (\text{ВА}),$$

$$S_C = U_C \cdot I_C = 220 \cdot 10 = 2200 (\text{ВА}),$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} = \sqrt{2200^2 + 2200^2} = 3111 (\text{ВА}).$$

### Символічний метод розрахунку

1) Виразимо в комплексній формі фазні напруги:

$$U_A = U_\phi = 220e^{j0^\circ} (\text{В}),$$

$$U_B = U_\phi e^{-j120^\circ} = 220e^{-j120^\circ} (\text{В}),$$

$$U_C = U_\phi e^{j120^\circ} = 220e^{j120^\circ} \text{ (В)},$$

2) Виразимо опір фаз в комплексній формі:

$$Z_A = R_A + jX_{LA} - jX_{CA} = 11 + j34 - j53 = 11 - j19 \text{ (Ом)},$$

$$Z_B = R_B + jX_{LB} = 11 + j19 \text{ (Ом)},$$

$$Z_C = -jX_{CC} = -j22 \text{ (Ом)}.$$

Перетворимо комплексні опори фаз з алгебраїчної форми запису в показникові форму.

$$Z_A = 11 - j19 = \sqrt{11^2 + 19^2} \cdot e^{j \arctg\left(\frac{-19}{11}\right)} = 22e^{-j60^\circ} \text{ (Ом)},$$

де  $Z_A = 22 \text{ Ом}$  – повний опір фази А;

$\varphi_A = -60^\circ$  – кут здвигу фаз між струмом й напругою в фазі А.

Аналогічно визначасмо:

$$Z_B = 11 + j19 = \sqrt{11^2 + 19^2} \cdot e^{j \arctg\left(\frac{19}{11}\right)} = 22e^{j60^\circ} \text{ (Ом)},$$

де  $Z_B = 22 \text{ Ом}$  – повний опір фази В;

$\varphi_B = 60^\circ$  – кут здвигу фаз між струмом й напругою в фазі В.

$$Z_C = -j22 = 22e^{-j90^\circ} \text{ (Ом)},$$

де  $Z_C = 22 \text{ Ом}$  – повний опір фази С;

$\varphi_C = -90^\circ$  – кут здвигу фаз між струмом й напругою в фазі С.

3) Знайдемо комплекси фазних струмів:

$$\dot{I}_A = \frac{\dot{U}_A}{Z_A} = \frac{220e^{j0^\circ}}{22e^{-j60^\circ}} = 10e^{j60^\circ} \text{ (А)};$$

модуль  $\dot{I}_A = 10 \text{ (А)}$ , аргумент  $\Psi_A = 60^\circ$ ;

$$\dot{I}_B = \frac{\dot{U}_B}{Z_B} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{22e^{j60^\circ}} = 10e^{-j180^\circ} \text{ (A)};$$

модуль  $\dot{I}_B = 10 \text{ (A)}$ , аргумент  $\Psi_B = -180^\circ$ ;

$$\dot{I}_C = \frac{\dot{U}_C}{Z_C} = \frac{220e^{j120^\circ}}{22e^{-j90^\circ}} = 10e^{j210^\circ} \text{ (A)};$$

модуль  $\dot{I}_C = 10 \text{ (A)}$ , аргумент  $\Psi_C = 210^\circ$ ;

Знайдемо алгебраїчну форму запису комплексів фазних струмів:

$$\dot{I}_A = 10e^{j60^\circ} = 10\cos(60^\circ) + j10\sin(60^\circ) = 5 + j8,66 \text{ (A)};$$

$$\dot{I}_B = 10e^{-j180^\circ} = 10\cos(-180^\circ) + j10\sin(-180^\circ) = -10 \text{ (A)};$$

$$\dot{I}_C = 10e^{j210^\circ} = 10\cos(210^\circ) + j10\sin(210^\circ) = -8,66 - j5 \text{ (A)}.$$

4) Обчислимо струм в нейтральному проводі:

$$\dot{I}_N = \dot{I}_A + \dot{I}_B + \dot{I}_C = 5 + j8,66 - 10 - 8,66 - j5 = -13,66 + j3,66 = 14,14e^{j165^\circ} \text{ (A)};$$

модуль  $\dot{I}_N = 14,14 \text{ (A)}$ , аргумент  $\Psi_N = 165^\circ$ .

5) Обчислимо потужності фаз й всієї схеми:

$$\begin{aligned} \dot{S}_A = \dot{U}_A \dot{I}_A &= 220 \cdot 10e^{-j60^\circ} = 2200e^{-j60^\circ} = 2200\cos(-60^\circ) + j2200\sin(-60^\circ) = \\ &= 1100 - j1905 \text{ (ВА)}, \end{aligned}$$

де  $S_A = 2200 \text{ (ВА)}$ ,  $P_A = 1100 \text{ (Вт)}$ ,  $Q_A = -1905 \text{ (ВАр)}$ ;

$$\begin{aligned} \dot{S}_B = \dot{U}_B \dot{I}_B &= 220e^{-j120^\circ} \cdot 10e^{j180^\circ} = 2200e^{j60^\circ} = 2200\cos(60^\circ) + j2200\sin(60^\circ) = \\ &= 1100 + j1905 \text{ (ВА)}, \end{aligned}$$

де  $S_B = 2200 \text{ (ВА)}$ ,  $P_B = 1100 \text{ (Вт)}$ ,  $Q_B = 1905 \text{ (ВАр)}$ ;

$$\begin{aligned} \dot{S}_C = \dot{U}_C \dot{I}_C &= 220e^{j120^\circ} \cdot 10e^{-j210^\circ} = 2200e^{-j90^\circ} = 2200\cos(-90^\circ) + j2200\sin(-90^\circ) = \\ &= -j2200 \text{ (ВА)}, \end{aligned}$$

де  $S_C = 2200$  (ВА),  $P_C = 0$  (Вт),  $Q_C = -2200$  (ВАр);

тоді потужність по всім трьом фазам буде дорівнювати:

$$\begin{aligned}\dot{S}_N &= \dot{S}_A + \dot{S}_B + \dot{S}_C = 1100 - j1905 + 1100 + j1905 - j2200 = 2200 - j2200 = (A); \\ &= 3111e^{-j45^\circ} \text{ (ВА)},\end{aligned}$$

де  $S = 3111$  (ВА),  $P = 2200$  (Вт),  $Q = -2200$  (ВАр);

### 3.2.2 Методика розрахунку трифазної електричної схеми змінного струму при з'єднанні споживачів трикутником

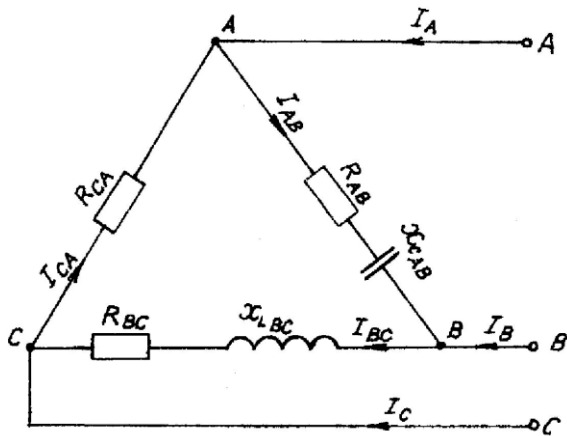


Рис.3.3

Дано:  $U_{\text{л}}=380$  (В),  $R_{AB}=19$  Ом,  $X_{CAB}=11$  Ом,  
 $R_{BC}=12$  Ом,  $X_{LBC}=16$  Ом,  $R_{CA}=22$  Ом

Визначити:  $I_A, I_B, I_C, I_{AB}, I_{BC}, I_{CA}, P, Q, S$ .

#### Рішення

При з'єднанні трифазної схеми трикутником розрахунок будемо вести в символічному методом.

1) Модулі фазних напруг при з'єднанні

$$U_{\text{л}} = U_{\text{ф}} = 380 \text{ (В)}, \text{ таким чином } U_{AB} = U_{BC} = U_{CA} = 380 \text{ (В)}.$$

Комплекси даних напруг запишемо з умови, що вектор  $\dot{U}_{AB}$  співпадає з діючою віссю комплексної площини,

$$\dot{U}_{AB} = U_{\text{л}} e^{j0^\circ} = 380 e^{j0^\circ} \text{ (В)},$$

$$\dot{U}_{BC} = U_{\text{л}} e^{-j120^\circ} = 380 e^{-j120^\circ} \text{ (В)},$$

$$\dot{U}_{CA} = U_{\text{л}} e^{j120^\circ} = 380 e^{j120^\circ} \text{ (В)}.$$

2) Обчислимо комплексні фазові опори:

$$Z_{AB} = R_{AB} - jX_{CAB} = 19 - j11 = 22e^{-j30^\circ} \text{ (Ом)},$$

де  $Z_{AB} = 22 \text{ (Ом)}$ ,  $\varphi_{AB} = -30^\circ$ ,

$$Z_{BC} = R_{BC} + jX_{LBC} = 12 + j16 = 20e^{j53^\circ} \text{ (Ом)},$$

де  $Z_{BC} = 20 \text{ (Ом)}$ ,  $\varphi_{BC} = 53^\circ$ ,

$$Z_{CA} = R_{CA} = 22 \text{ (Ом)},$$

де  $Z_{CA} = 22 \text{ (Ом)}$ ,  $\varphi_{CA} = 0^\circ$ .

3) Визначимо фазні струми:

$$\dot{I}_{AB} = \frac{\dot{U}_{AB}}{Z_{AB}} = \frac{380e^{j0^\circ}}{22e^{-j30^\circ}} = 17,27e^{j30^\circ} = 14,96 + j8,64 \text{ (А)};$$

модуль  $I_{AB} = 17,27 \text{ (А)}$ , аргумент  $\Psi_{AB} = 30^\circ$ ;

$$\dot{I}_{BC} = \frac{\dot{U}_{BC}}{Z_{BC}} = \frac{220e^{-j120^\circ}}{22e^{j53^\circ}} = 19e^{-j173^\circ} = -18,86 - j2,32 \text{ (А)};$$

модуль  $I_{BC} = 19 \text{ (А)}$ , аргумент  $\Psi_{BC} = -173^\circ$ ;

$$\dot{I}_{CA} = \frac{\dot{U}_{CA}}{Z_{CA}} = \frac{220e^{j120^\circ}}{22e^{j0^\circ}} = 17,27e^{j120^\circ} = -8,64 + j14,96 \text{ (А)};$$

модуль  $I_{CA} = 17,27 \text{ (А)}$ , аргумент  $\Psi_{CA} = 120^\circ$ ;

4) Знайдемо лінійні струми з рівнянь по першому закону Кірхгофа для вузлів А, В та С.

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA} = 14,96 + j6,64 + 8,64 - j14,96 = 23,6 - j6,32 = 24,43e^{-j15^\circ} \text{ (А)};$$

модуль  $I_A = 24,43 \text{ (А)}$ , аргумент  $\Psi_A = -15^\circ$ ;

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB} = -19,86 - j2,32 - 14,96 - j8,64 = -33,82 - j10,96 = 35,55e^{j198^\circ} \text{ (А)};$$

модуль  $I_B = 35,55 \text{ (А)}$ , аргумент  $\Psi_B = 198^\circ$ ;

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC} = -8.64 + j14.96 + 18.86 + j2.32 = 10.22 + j17.28 = 20.1e^{j59.4^\circ} \text{ (A)};$$

модуль  $I_A = 20.1 \text{ (A)}$ , аргумент  $\Psi_A = 59.4^\circ$ .

5) Обчислимо потужності кожної фази й всієї схеми:

$$\begin{aligned} \dot{S}_{AB} = \dot{U}_{AB}\dot{I}_{AB} &= 380e^{0^\circ} \cdot 17.24e^{-j30^\circ} = 6563e^{-j30^\circ} = 6563\cos(-30^\circ) + j6563\sin(-30^\circ) = \\ &= 5684 - j3282 \text{ (ВА)}, \end{aligned}$$

де  $S_{AB} = 6563 \text{ (ВА)}$ ,  $P_{AB} = 5684 \text{ (Вт)}$ ,  $Q_{AB} = -3282 \text{ (ВАр)}$ ;

$$\begin{aligned} \dot{S}_{BC} = \dot{U}_{BC}\dot{I}_{BC} &= 380e^{-j120^\circ} \cdot 19e^{j173^\circ} = 7220e^{j53^\circ} = 7220\cos(53^\circ) + j7220\sin(53^\circ) = \\ &= 4345 + j5766 \text{ (ВА)}, \end{aligned}$$

де  $S_{BC} = 7220 \text{ (ВА)}$ ,  $P_{BC} = 4345 \text{ (Вт)}$ ,  $Q_{BC} = 5766 \text{ (ВАр)}$ ;

$$\dot{S}_{CA} = \dot{U}_{CA}\dot{I}_{CA} = 380e^{j120^\circ} \cdot 17.27e^{-j120^\circ} = 6563e^{j0^\circ} = 6563 \text{ (ВА)},$$

де  $S_{CA} = 6563 \text{ (ВА)}$ ,  $P_{CA} = 6563 \text{ (Вт)}$ ,  $Q_{CA} = 0 \text{ (ВАр)}$ ;

тоді потужність по всім трьом фазам буде дорівнювати:

$$\begin{aligned} \dot{S} = \dot{S}_{AB} + \dot{S}_{BC} + \dot{S}_{CA} &= 5684 - j3282 + 4345 + j5766 + 6563 = 16592 + j2484 = \text{ (A)}; \\ &= 16777e^{j8.5^\circ} \text{ (ВА)}, \end{aligned}$$

де  $S = 16777 \text{ (ВА)}$ ,  $P = 16592 \text{ (Вт)}$ ,  $Q = 2484 \text{ (ВАр)}$ ;

б) Будуємо в масштабі векторну діаграму напруги й струмів. Вектори фазних струмів  $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$  будуються під кутами  $\Psi_{AB}, \Psi_{BC}, \Psi_{CA}$  к дійсної осі. К кінцям векторів  $\dot{I}_{AB}, \dot{I}_{BC}, \dot{I}_{CA}$  приєднуються від'ємні фазні струми згідно рівнянням:

$$\dot{I}_A = \dot{I}_{AB} - \dot{I}_{CA}$$

$$\dot{I}_B = \dot{I}_{BC} - \dot{I}_{AB}$$

$$\dot{I}_C = \dot{I}_{CA} - \dot{I}_{BC}$$

Обираємо масштаб:  $M_I = 4 \text{ А/см}$ .

$$L_{IAB} = \frac{I_{AB}}{M_I} = \frac{17,27}{4} = 4,3 \text{ (cm)}$$

$$L_{IBC} = \frac{I_{BC}}{M_I} = \frac{19}{4} = 4,75 \text{ (cm)}$$

$$L_{ICA} = \frac{I_{CA}}{M_I} = \frac{17,27}{4} = 4,3 \text{ (cm)}$$

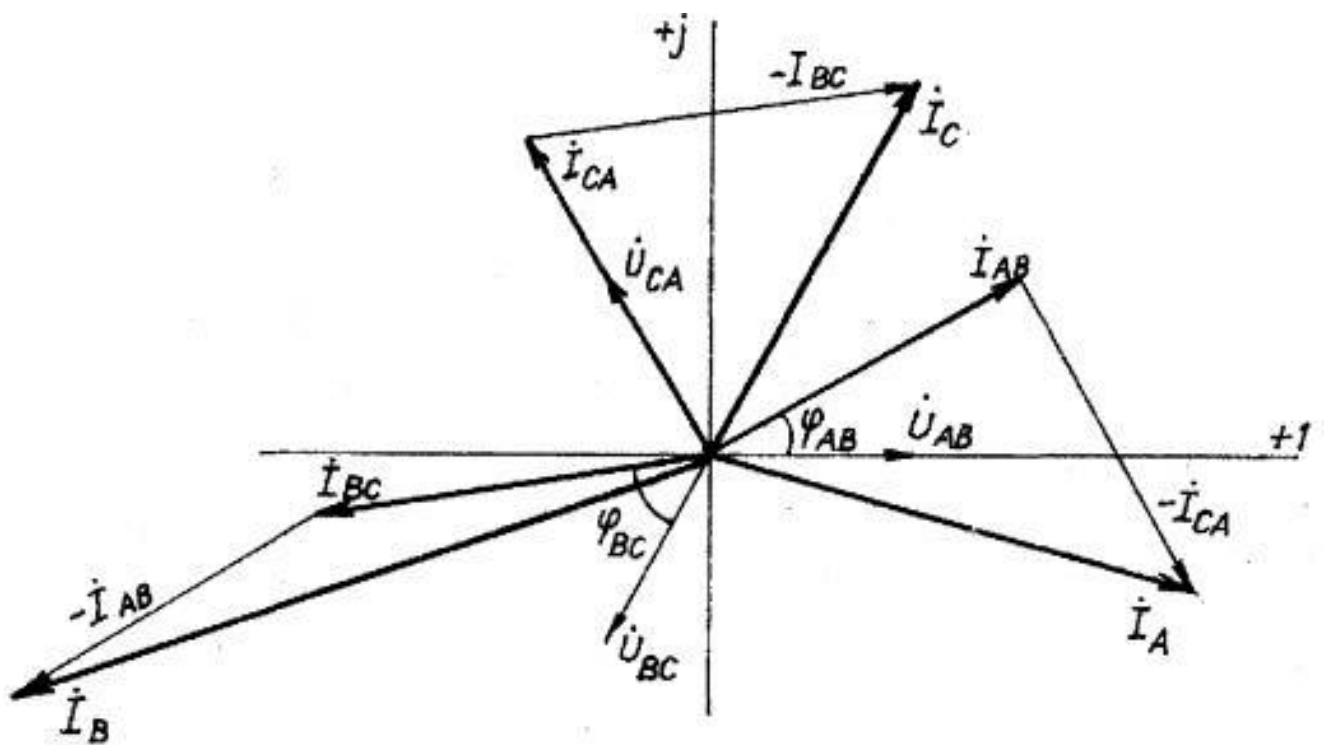


Рис.3.4

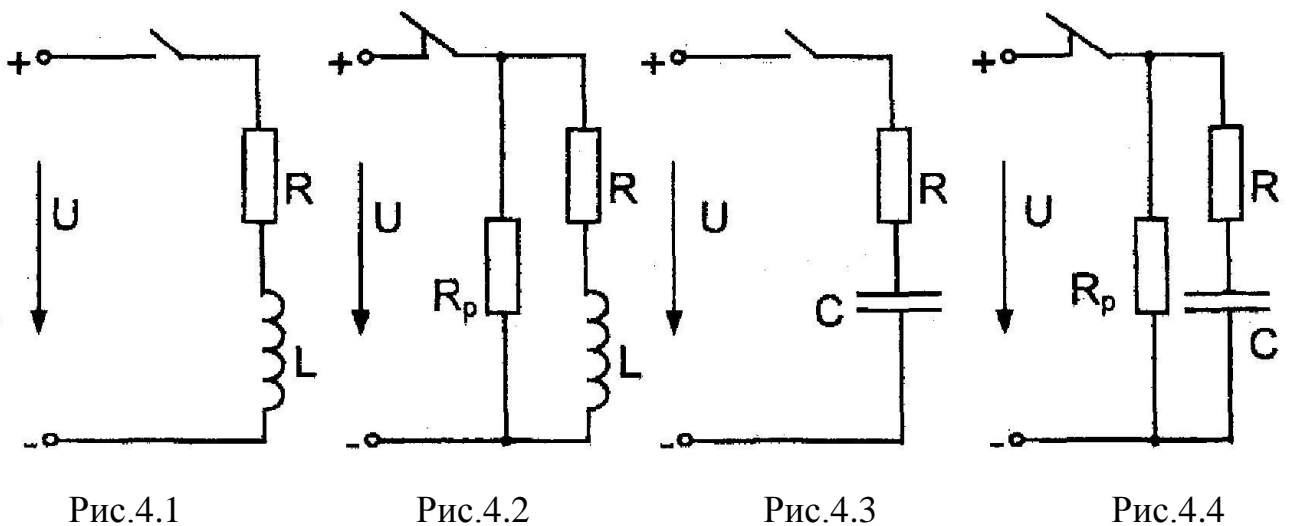
## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ЕЛЕКТРИЧНИХ СХЕМАХ

### 4.1 Розрахунок перехідних процесів в електричних схемах

При замиканні й розмиканні вимикача схема (рис.4.1 – рис.4.4), що має індуктивність або ємність, підключається до джерела постійної напруги або відключається від нього.

Визначити практичний час перехідного процесу, струм в схемі та енергію електричного або магнітного поля при  $t = 3 \tau$ . Побудувати графіки  $i = f(t)$  й  $e_L = f(t)$  для рис.4.1, рис.4.2 або  $u_C = f(t)$  й  $i = f(t)$  для рис.4.3, рис.4.4.

Дані для розрахунку наведено в табл. 4.1.



Таблиця 4.1

Чисельні параметри електричних схем при дослідженні перехідних процесів

№	L, Гн	C, мкФ	R, Ом	R <sub>p</sub> , Ом	U, В	Номер рисунка
1	0,25	-	25	-	100	рис. 4.1
2	0,5	-	25	25	50	рис. 4.2
3	-	800	150	-	150	рис. 4.3
4	-	100	500	500	200	рис. 4.4
5	0,5	-	50	-	100	рис. 4.1
6	0,28	-	50	50	100	рис. 4.2
7	-	50	10 <sup>4</sup>	-	50	рис. 4.3
8	-	300	50	50	25	рис. 4.4

№	L, Гн	C, мкФ	R, Ом	R <sub>p</sub> , Ом	U, В	Номер рисунка
9	0,6	-	30	-	60	рис. 4.1
10	0,9	-	300	150	450	рис. 4.2
11	-	50	100	-	50	рис. 4.3
12	-	150	100	10	50	рис. 4.4
13	0,5	-	10	-	100	рис. 4.1
14	0,16	-	60	20	80	рис. 4.2
15	-	20	10 <sup>5</sup>	-	100	рис. 4.3
16	-	15	600	1200	180	рис. 4.4
17	0,5	-	10	-	150	рис. 4.1
18	0,12	-	12	10	60	рис. 4.2
19	-	100	2000	-	300	рис. 4.3
20	-	30	300	400	400	рис. 4.4
21	0,8	-	70	-	70	рис. 4.1
22	0,75	-	140	60	200	рис. 4.2
23	-	50	10 <sup>4</sup>	-	50	рис. 4.3
24	-	10	2·10 <sup>6</sup>	10 <sup>4</sup>	300	рис. 4.4
25	1,25	-	25	-	50	рис. 4.1
26	0,8	-	40	60	100	рис. 4.2
27	-	40	10 <sup>4</sup>	-	200	рис. 4.3
28	-	100	2000	1000	300	рис. 4.4
29	0,5	-	10	-	50	рис. 4.1
30	-	25	3·10 <sup>4</sup>	-	300	рис. 4.2

## 4.2 Методика дослідження перехідних процесів електричних схемах

4.2.1 Методика дослідження перехідних процесів в електричних схемах з індуктивністю

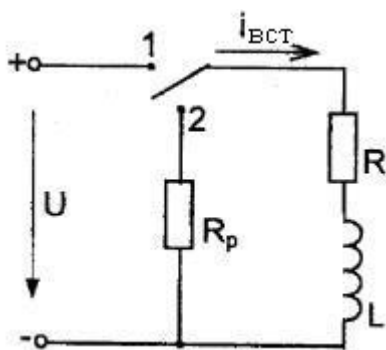


Рис. 4.5

Ланцюг складається з індуктивності  $L = 200$  мГн, опору  $R = 10$  Ом,  $R_p = 10$  Ом, напруги джерела живлення  $U = 60$  В. Визначити закон зміни струму та ЕРС самоіндукції в ланцюзі. Визначити практичну тривалість перехідного процесу й енергію магнітного поля при  $t = 3\tau$ . Схема приведена на рис.2.46.

Дано:  $U = 60$  В,  $R = 10$  Ом,  $L = 200$  мГн,  $R_p = 10$  Ом.

Визначити:  $i = f(t)$ ,  $t$ ,  $e_L = f(t)$ ,  $W_M$

### Рішення

1) Встановлюємо перемикач в положення 1 (підключення індуктивності до джерела постійної напруги).

До замикання перемикача в положення 1 струм в ланцюзі дорівнював нулю. В перший момент часу після замикання перемикача в положення 1, в момент початку перехідного процесу ( $t = 0$ ), струм в ланцюзі буде мати значення так ж як і до початку комутації, –  $i(0) = 0$ .

Після комутації струм намагається досягнути величини встановленого струму ( $i_{вст}$ ), але при враховуванні першого закону комутації зміна буде проводиться не стрибком, а поступово.

Згідно до схеми:

$$i_{вст} = I = \frac{U}{R} = \frac{60}{10} = 6 \text{ (A)},$$

Для того щоб знайти закон зміни перехідного струму, запишемо рівняння в загальному виді:

$$i = i_{вст} + i_{віль} = i_{вст} + Ae^{\frac{-t}{\tau}} \quad (4.1)$$

В цій формулі

$$i_{віль} = Ae^{\frac{-t}{\tau}}, \quad (4.2)$$

де  $i_{віль}$  – вільна складова струму%

$A$  – постійна інтегрування;

$\tau$  – постійна часу перехідного процесу;

$$\tau = \frac{L}{R} \quad (4.3)$$

$R$  – величина опору, через яке проходить перехідний струм;

$t$  – час.

Визначимо постійну інтегрування, запишемо рівняння (4.1) при часі  $t$  рівному нулю:

$$i(0) = i_{\text{вст}} + A \quad (4.4)$$

Тобто  $A = -I$ .

Запишемо рівняння (закон зміни перехідного струму) при включенні індуктивності:

$$i = i_{\text{вст}} + i_{\text{ввл}} = i_{\text{вст}} + Ae^{\frac{-t}{\tau}} = I - Ie^{\frac{-t}{\tau}} = I(1 - e^{\frac{-t}{\tau}}) \quad (4.5)$$

$$i = 6 \cdot (1 - e^{\frac{-t}{\tau}})$$

Знайдемо постійну часу перехідного процесу

$$\tau = \frac{L}{R} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{10} = \frac{0,2}{10} = 0,02 \text{ (с)}.$$

Побудуємо графік перехідного струму  $i = f(t)$ , приймаючи момент часу  $t = 0$ ,  $t = \tau$ ,  $t = 2\tau$ ,  $t = 3\tau$ ,  $t = 4\tau$ ,  $t = 5\tau$ .

Значення перехідного струму для заданих значень часу:

$$t = 0, i(0) = 6 \cdot (1 - e^{\frac{0}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - 1) = 0 \text{ (А)},$$

$$t = \tau, i(0) = 6 \cdot (1 - e^{\frac{-\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-1}) = 6 \cdot (1 - 0,367) = 3,79 \text{ (А)},$$

$$t = 2\tau, i(0) = 6 \cdot (1 - e^{\frac{-2\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-2}) = 6 \cdot (1 - 0,135) = 5,19 \text{ (А)},$$

$$t = 3\tau, i(0) = 6 \cdot (1 - e^{\frac{-3\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-3}) = 6 \cdot (1 - 0,049) = 5,70 \text{ (А)},$$

$$t = 4\tau, i(0) = 6 \cdot (1 - e^{\frac{-4\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-4}) = 6 \cdot (1 - 0,018) = 5,89 \text{ (А)},$$

$$t = 5\tau, i(0) = 6 \cdot (1 - e^{\frac{-5\tau}{\tau}}) = 6 \cdot (1 - e^{-5}) = 6 \cdot (1 - 0,007) = 5,96 \text{ (А)}.$$

Побудуємо графік  $i = f(t)$

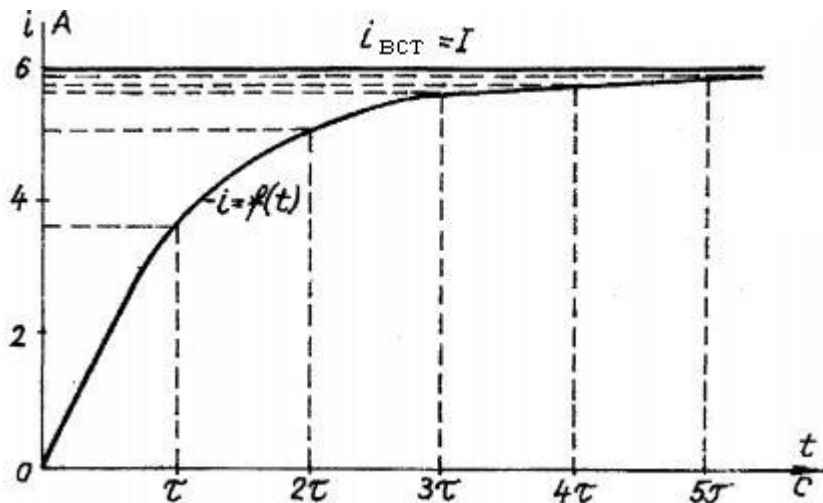


Рис.4.6

Закон зміни ЕРС самоіндукції можна отримати з формули:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt} (I - Ie^{-\frac{t}{\tau}}) = -I \cdot L \cdot \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = -I \cdot L \cdot \frac{R}{L} e^{-\frac{t}{\tau}} = -I \cdot R \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = -U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (4.6)$$

$$e_L = -60 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ (В)}.$$

Значення  $e$  для заданих значень часу наступні:

$$t = 0, e_0 = -60e^0 = -60 \text{ (В)},$$

$$t = \tau, e_1 = -60e^{-1} = -60 \cdot 0,367 = -22,02 \text{ (В)},$$

$$t = 2\tau, e_2 = -60e^{-2} = -60 \cdot 0,135 = -8,1 \text{ (В)},$$

$$t = 3\tau, e_3 = -60e^{-3} = -60 \cdot 0,049 = -2,94 \text{ (В)},$$

$$t = 4\tau, e_4 = -60e^{-4} = -60 \cdot 0,018 = -1,08 \text{ (В)},$$

$$t = 5\tau, e_5 = -60e^{-5} = -60 \cdot 0,007 = -0,42 \text{ (В)},$$

Будуємо графік  $e_L = f(t)$ .

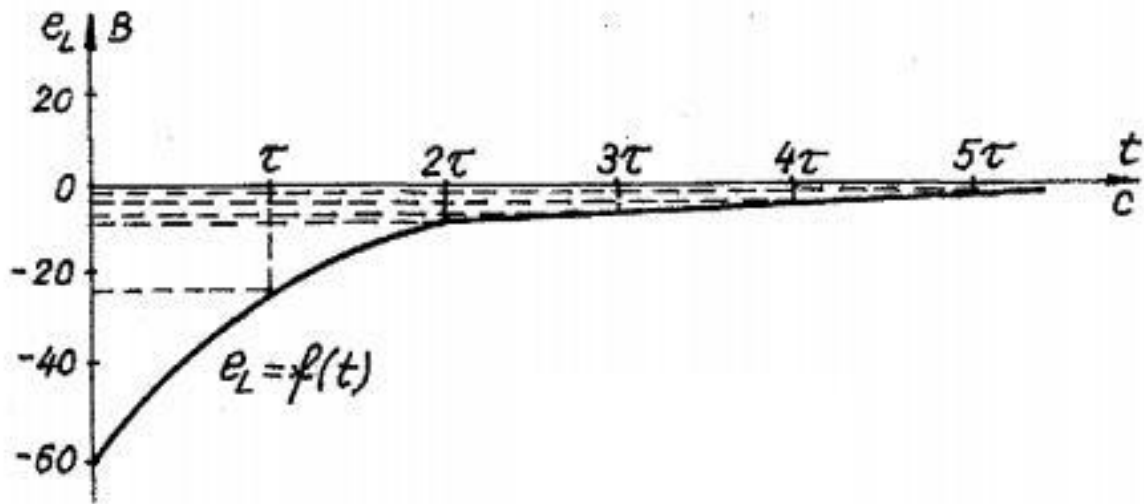


Рис.4.7

Обчислимо енергію магнітного поля при  $t = 2\tau$ :

$$W_M = \frac{L \cdot i_2^2}{2} = \frac{0,2 \cdot 5,19^2}{2} = 2,96 \text{ (Дж)}.$$

2) Перемикаємо перемикач з положення 1 в положення 2 (відключаємо індуктивність від джерела постійної напруги при одночасному замиканні індуктивності на опір).

В цьому випадку ми відключаємо ланцюг від джерела й при перемиканні в положення 2 в отриманому контурі струм буде підтримуватися за рахунок енергії, накопленої в магнітному полі індуктивності. Енергія магнітного поля неперервно зменшується, так як в активному опорі контуру йде незворотній процес перетворення електричної енергії в теплову.

В цьому випадку  $i_{вст} = 0$ , так як при відключенні ланцюгу від джерела струм ланцюгу буде дорівнювати нулю.

Тоді 
$$i = A e^{\frac{-t}{\tau}} \quad (4.7)$$

де  $t = \frac{L}{R + R_p} = \frac{0,2}{10 + 10} = \frac{0,2}{20} = 0,01 \text{ (с)}$  – постійна часу перехідного процесу.

Визначимо постійну інтегрування, при  $t = 0$ , тоді рівняння (4.7) прийме вид:

$$i(0) = A e^{\frac{0}{\tau}} = A, \quad (4.8)$$

згідно до першого закону комутації струм в перший момент часу комутації буде таким, яким він був в останній момент до комутації:

$$i(0) = \frac{U}{R} = \frac{60}{10} = 6 \text{ (A)}, \text{ тоді } i(t) = 6e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ (A)},$$

Побудуємо графік перехідного струму  $i = f(t)$ , приймаючи момент часу  $t = 0$ ,  $t = \tau$ ,  $t = 2\tau$ ,  $t = 3\tau$ ,  $t = 4\tau$ ,  $t = 5\tau$ . Дані розрахунку наведемо в табл. 4.2.

Таблиця 4.2

t, с	0	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$
i, A	6	2,2	0,81	0,294	0,108	0,012

Побудуємо графік  $i = f(t)$ .

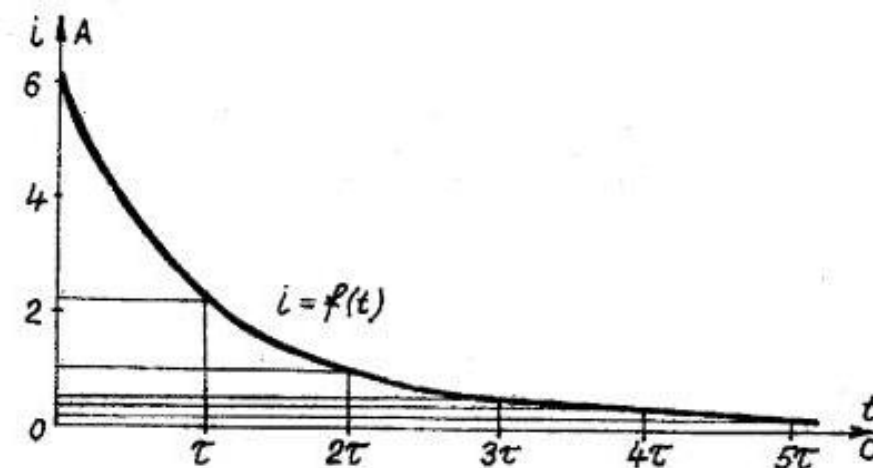


Рис.4.8

У відповідності до закону про зміну ЕРС самоіндукції отримаємо:

$$e_L = -L \frac{di}{dt} = -L \frac{d}{dt} (6e^{-\frac{t}{\tau}}) = 6 \cdot L \cdot \frac{1}{\tau} e^{-\frac{t}{\tau}} = 6 \cdot L \cdot \frac{R}{L} e^{-\frac{t}{\tau}} = 6 \cdot R \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} = 60 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ (В)} \quad (4.9)$$

$$e_L = 60 \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ (В)}$$

Побудуємо графік перехідного струму  $e_L = f(t)$ , приймаючи момент часу  $t = 0$ ,  $t = \tau$ ,  $t = 2\tau$ ,  $t = 3\tau$ ,  $t = 4\tau$ ,  $t = 5\tau$ . Дані розрахунку наведемо в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

t, c	0	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$
$e_L, B$	60	22,02	8,1	2,94	1,08	0,12

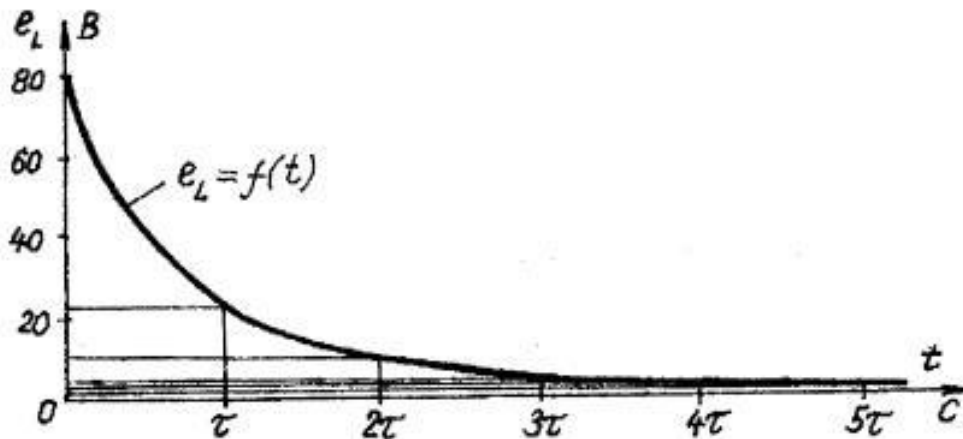


Рис.4.9

4.2.2 Методика дослідження перехідних процесів в електричних ланцюгах з конденсатором та опором

У ланцюгу послідовно під'єднані конденсатор ємністю  $C = 10$  мкФ та опір  $R = 2$  МОм до джерела постійної напруги  $U = 50$  В (перемикач в положенні 1). Визначити закони зміни перехідних напруг й струмів при заряді конденсатора й побудувати їх графіки. Після того ланцюг відмикається від джерела й одночасно перемикач переводиться в положення 2,  $R_p = 8$  МОм. Визначити закони зміни перехідних напруг й струму при розряді конденсатора й побудувати їх графіки. Визначити практичну тривалість заряду й розряду конденсатора й енергії електричного поля при  $t = 3\tau$ . Схема приведена на рис.2.47.

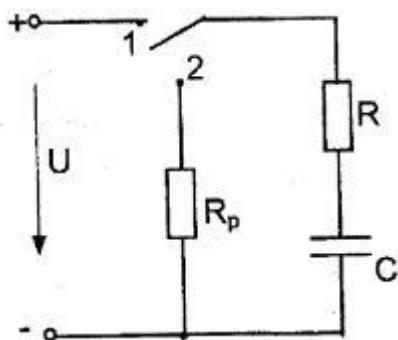


Рис. 4.10

Дано:  $U=50$  В,  $R=2$  МОм,  $C=10$  мкФ,  $R_p=8$  МОм.

Визначити:  $i = f(t)$ ,  $t$ ,  $u_c = f(t)$ ,  $W_9$

Рішення

1) Перемикач в положенні 1 (заряд конденсатора).

Швидкість заряду конденсатора залежить від параметрів ланцюгу й характеризується постійною часу заряду конденсатора.

$$\tau = R \cdot C = 2 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 20 \text{ (с)}.$$

На підставі другого закону комутації отримані закони, що характеризують напругу й струм при заряді конденсатора:

$$u_c = u_{вст} + u_{впл} = U - Ue^{-\frac{t}{\tau}} = U(1 - e^{-\frac{t}{\tau}})$$

$$i = i_{впл} = \frac{U}{R} e^{-\frac{t}{\tau}} = Ie^{-\frac{t}{\tau}},$$

де  $U$  – напруга джерела,

$u_{вст} = U$  – встановлене значення напруги при заряді конденсатора.

$u_{впл} = -Ue^{-\frac{t}{\tau}}$  – вільна складова напруги при заряді конденсатора.

Зарядний струм дорівнює вільній складовій, так як струм встановленого режиму дорівнює нулю ( $i_{вст} = 0$ ).

Тривалість заряду конденсатора:

$$t = 5\tau = 5 \cdot 20 = 100 \text{ (с)}.$$

Визначимо значення напруги на конденсаторі при його заряді для значень часу  $t = 0, t = \tau, t = 2\tau, t = 3\tau, t = 4\tau, t = 5\tau$ .

$$t = 0, u_c(0) = U \cdot (1 - e^{-\frac{0}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-\frac{0}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - 1) = 0 \text{ (В)},$$

$$t = \tau, u_c(0) = U \cdot (1 - e^{-\frac{\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-1}) = 50 \cdot (1 - 0,367) = 31,6 \text{ (В)},$$

$$t = 2\tau, u_c(0) = U \cdot (1 - e^{-\frac{2\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-2}) = 50 \cdot (1 - 0,135) = 43,23 \text{ (В)},$$

$$t = 3\tau, u_c(0) = U \cdot (1 - e^{-\frac{3\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-3}) = 50 \cdot (1 - 0,049) = 47,51 \text{ (В)},$$

$$t = 4\tau, u_c(0) = U \cdot (1 - e^{-\frac{4\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-4}) = 50 \cdot (1 - 0,018) = 49,08 \text{ (В)},$$

$$t = 5\tau, u_c(0) = U \cdot (1 - e^{-\frac{5\tau}{\tau}}) = 50 \cdot (1 - e^{-5}) = 50 \cdot (1 - 0,007) = 49,66 \text{ (В)}.$$

Аналогічно визначаємо значення зарядного струму згідно закону зміни перехідного струму при заряді конденсатора для значень часу  $t = 0, t = \tau, t = 2\tau, t = 3\tau, t = 4\tau, t = 5\tau$ . Дані розрахунку наведені в табл.4.4.

Таблиця 4.4

t, с	0	$\tau$	$2\tau$	$3\tau$	$4\tau$	$5\tau$
i, мкА	25	9,19	3,38	1,24	0,46	0,17

Згідно до отриманих результатів побудуємо графіки зарядної напруги й струму в залежності від  $\tau$  (рис.4.11).

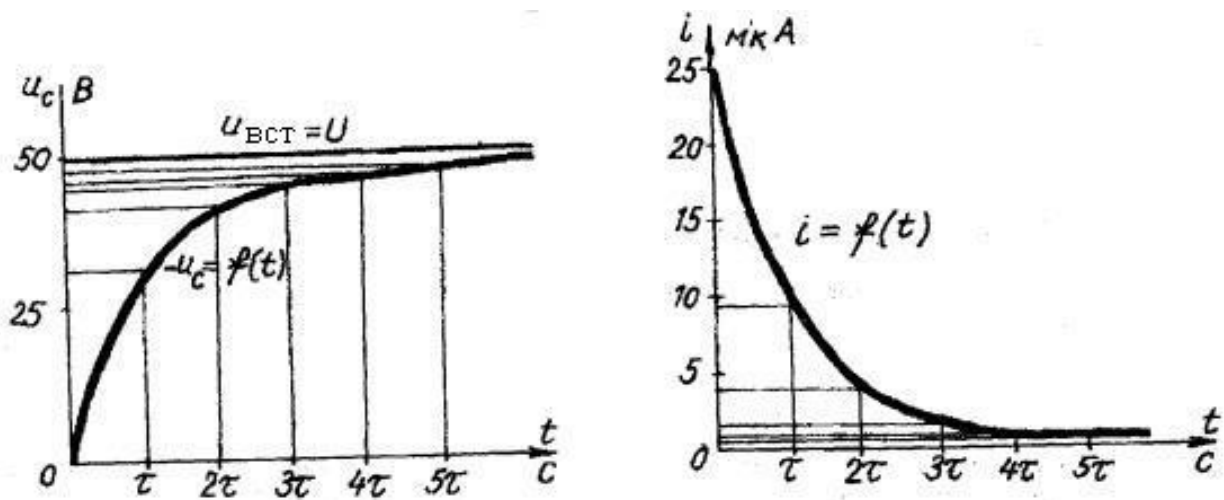


Рис.4.11

З побудованих рисунків  $u_c(t)$  та  $i(t)$  можна для любого моменту часу визначити значення  $u_c$  та  $i$ , а також розрахувати запасену енергію в електричному полі зарядженого конденсатора.

Наприклад, при  $t = 3\tau$

$$W_3 = \frac{C \cdot u_{c3}^2}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 47,51^2}{2} = 0,113 \text{ (Дж)}.$$

2) Перемикач в положенні 2 (конденсатор розряджається через опір R та  $R_p$ ).

Швидкість розряду конденсатора також залежить від параметрів схеми й характеризується постійною часу розряду конденсатора.

$$\tau = (R + R_p) \cdot C = (2 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^6) \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 10 \cdot 10^6 \cdot 10 \cdot 10^{-6} = 100 \text{ (с)}.$$

На підставі другого закону комутації отримаємо закони зміни напруги й струму при розряді конденсатора:

$$u_c = u_{\text{Вил}} = U \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

$$i = i_{\text{Вил}} = -\frac{U}{R + R_p} e^{-\frac{t}{\tau}} = -I \cdot e^{-\frac{t}{\tau}},$$

де  $U$  – напруга зарядженого конденсатора до початку розряду.

Розрядні напруга й струм дорівнюють їх вільним складовим, тому що напруга й струм усталеного режиму після розряду дорівнюють нулю.

Тривалість розряду конденсатора

$$t = 5 \cdot \tau = 100 \cdot 5 = 500(\text{с})$$

Обчислимо значення напруги на конденсаторі при його розряді для значень часу  $t = 0, t = \tau, t = 2\tau, t = 3\tau, t = 4\tau, t = 5\tau$ .

$$t = 0, u_c(0) = U \cdot e^{-\frac{0}{\tau}} = 50 \cdot e^{-\frac{0}{\tau}} = 50 \text{ (В)},$$

$$t = \tau, u_c(\tau) = U \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}} = 50 \cdot e^{-1} = 50 \cdot 0,367 = 18,39 \text{ (В)},$$

$$t = 2\tau, u_c(2\tau) = U \cdot e^{-\frac{2\tau}{\tau}} = 50 \cdot e^{-2} = 50 \cdot 0,135 = 6,77 \text{ (В)},$$

$$t = 3\tau, u_c(3\tau) = U \cdot e^{-\frac{3\tau}{\tau}} = 50 \cdot e^{-3} = 50 \cdot 0,049 = 2,49 \text{ (В)},$$

$$t = 4\tau, u_c(4\tau) = U \cdot e^{-\frac{4\tau}{\tau}} = 50 \cdot e^{-4} = 50 \cdot 0,018 = 0,92 \text{ (В)},$$

$$t = 5\tau, u_c(5\tau) = U \cdot e^{-\frac{5\tau}{\tau}} = 50 \cdot e^{-5} = 50 \cdot 0,007 = 0,34 \text{ (В)}.$$

Аналогічно обчислюємо значення розрядного струму згідно до закону зміни перехідного струму при розряді конденсатору для тих же значень часу

$$i = i_{\text{Вил}} = -\frac{U}{R + R_p} e^{-\frac{t}{\tau}} = -\frac{50}{2 \cdot 10^6 + 8 \cdot 10^6} e^{-\frac{t}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{t}{\tau}} \text{ (А)}.$$

Знак «-» говорить про те, що розрядний струм має зворотній напрям порівняно з зарядним струмом.

$$t = 0, i_0(0) = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{0}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^0 = -5 \cdot 10^{-6} = -5 \text{ (мкА)},$$

$$t = \tau, i_1(\tau) = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-1} = -1,84 \cdot 10^{-6} = -1,84 \text{ (мкА)},$$

$$t = 2\tau, i_2(2\tau) = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{2\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-2} = -0,68 \cdot 10^{-6} = -0,68 \text{ (мкА)},$$

$$t = 3\tau, i_3(3\tau) = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{3\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-3} = -0,25 \cdot 10^{-6} = -0,25 \text{ (мкА)},$$

$$t = 4\tau, i_4(4\tau) = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{4\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-4} = -0,092 \cdot 10^{-6} = -0,092 \text{ (мкА)},$$

$$t = 5\tau, i_5(5\tau) = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-\frac{5\tau}{\tau}} = -5 \cdot 10^{-6} \cdot e^{-5} = -0,034 \cdot 10^{-6} = -0,034 \text{ (мкА)}.$$

Згідно отриманим розрахункам побудуємо графіки розрядної напруги й струму в залежності від  $\tau$  (рис.4.12).

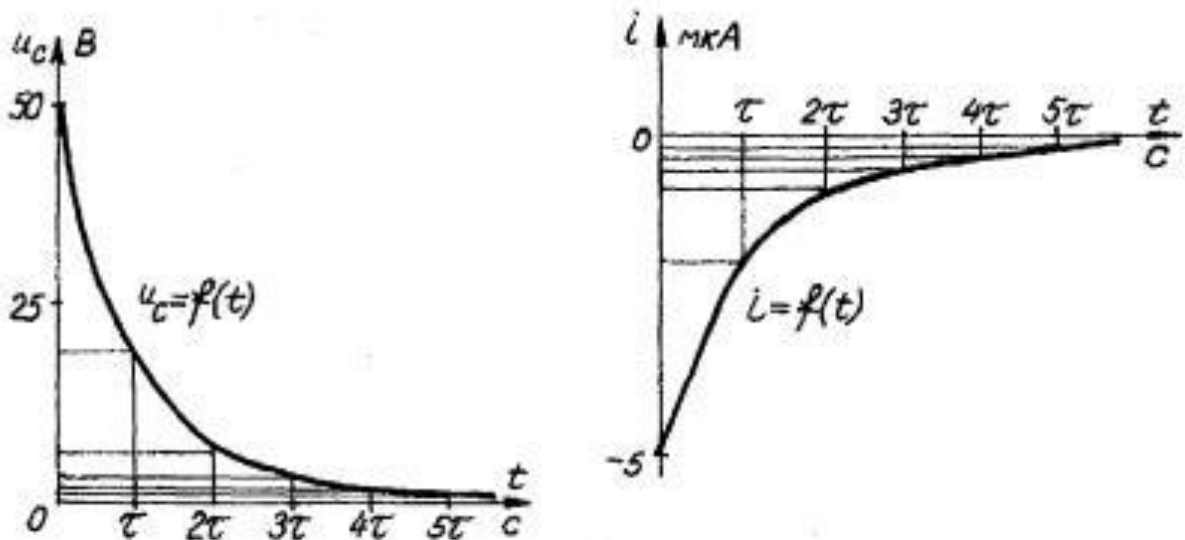


Рис.4.12

Енергія електричного поля конденсатора в момент часу  $t = 3\tau$  :

$$W_3 = \frac{C \cdot u_{c3}^2}{2} = \frac{10 \cdot 10^{-6} \cdot 2,49^2}{2} = 31 \cdot 10^{-6} \text{ (Дж)}.$$

## ДЖЕРЕЛА ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Зевеке Г.В. Основы теории цепей / Г.В. Зевеке, П.А. Ионкин, А.В. Нетушил, С.В. Страхов. – М.: Энергоатомиздат.– 1989. – 528 с.
2. Бессонов Л.А. Теоретические основы электротехники: Электрические цепи. – М.: Высшая школа. – 1984.
3. Нейман Л.Р. Теоретические основы электротехники / Л.Р. Нейман, К.С. Демирчан. – Л.: Энергоиздат. – 1981.
4. Шебес М.Р. Задачник по теории линейных электрических цепей / М.Р. Шебес. – М.: Высшая школа. – 1982.
5. Ионкин П.А. Сборник задач и упражнений по теоретическим основам электротехники / П.А. Ионкин. – М.: Энергоиздат. – 1982.
6. Матаханов П.Н. Сборник задач по теории электрических цепей: Учебное пособие для вузов / П.Н. Матаханов, Л.В. Данилов. – М.: Высшая школа. – 1980.

**В. О. Волков**  
*к.т.н., доцент*

## **ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ**

**Методичні вказівки**  
**до виконання курсової роботи, розрахунково-графічних,**  
**контрольних та самостійних робіт**

*для студентів ЗДІА*  
*напряму 6.050602 "Гідроенергетика"*  
*денної та заочної форм навчання*

Підписано до друку 20.05.2015р. Формат 60x84 1/32. Папір офсетний.  
Умовн. друк. арк. 2,9. Наклад 3 прим.  
Внутрішній договір № 74/15

Запорізька державна інженерна академія  
Свідоцтво про внесення до Державного реєстру суб'єктів  
видавничої справи ДК № 2958 від 03.09.2007 р.

Віддруковано друкарнею  
Запорізької державної інженерної академії  
з оригінал-макету авторів

69006, м. Запоріжжя, пр. Леніна, 226  
ЗДІА